

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II

Scuola di Dottorato in Ingegneria Industriale



DOTTORATO DI RICERCA IN INGEGNERIA DEI SISTEMI MECCANICI

XXII CICLO

TESI

L'ILLUMINAZIONE NATURALE PER IL RISPARMIO ENERGETICO ED IL COMFORT VISIVO.

ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE

TUTOR

Prof. Laura BELLIA

DOTTORANDO

ing. Giuseppe Fabio IULIANO

COORDINATORE DEL DOTTORATO

Prof. Raffaele TUCCILLO

INDICE

INTRODUZIONE.....	4
1.LA DOMANDA DI LUCE NATURALE NEGLI AMBIENTI CONFINATI: PRINCIPALI VANTAGGI E SVANTAGGI.....	9
Introduzione.....	9
1.1.La luce naturale e l'occhio.....	11
1.2.La domanda di luce naturale per le diverse attività svolte negli ambienti confinati.....	15
1.3.Aspetti fisiologici e psicologici della luce naturale.....	20
1.4.Il contributo della luce naturale al risparmio energetico	24
1.5.Il contributo della luce naturale al comfort visivo	28
1.6.Sistemi di integrazione e controllo della luce negli ambienti confinati per fini energetici e di comfort. ...	31
2.ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE DELLA LUCE NATURALE.....	45
Introduzione (Integrazione Luce Naturale/ Artificiale).....	45
2.1.Indicatori prestazionali della luce naturale negli ambienti confinati.....	47
DAYLIGHT FACTOR.....	50
VH RATIO.....	52
UDI - USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE.....	53
LENI – Lighting Energy Numeric Indicator.....	55
GLARE INDEX.....	56
DGI – DAYLIGHT GLARE INDEX.....	57
ALTRI INDICI DI ABBAGLIAMENTO.....	60

2.2.Applicabilità ed affidabilità del DGI.....	66
2.3.Messa a punto di un sistema innovativo per la misura delle luminanze del campo di vista.....	69
3.Applicazioni in campo del sistema di valutazione messo a punto.....	76
Introduzione.....	76
3.1.Analisi e prove eseguite per il comfort visivo.....	79
3.2.Analisi e prove eseguite per il risparmio energetico.....	85
3.2.1. La luce naturale nella valutazione energetica della norma EN 15193/2007.....	90
4.Conclusioni.....	98
Bibliografia.....	101

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, nonostante la significativa crisi che ha colpito l'economia internazionale, i risultati provenienti dagli studi e dalle ricerche condotte dalla comunità scientifica, e di riflesso il quadro legislativo e normativo che viene delineato dai vertici dei paesi più avanzati, sembrano segnare una svolta all'evoluzione economico-sociale iniziata nei decenni passati, con ritmi incalzanti e poco attenta alle condizioni al contorno di carattere ambientale ed energetico nella loro accezione più ampia.

La filosofia sta cambiando, si sta passando da un atteggiamento puramente speculativo e di sfruttamento delle risorse offerte dalla Terra, ad un modo di vivere e di approcciare all'ambiente più attento e cosciente che le risorse energetiche convenzionali sono esauribili e che i vantaggi si possono trarre, non solo dall'attuazione di politiche di incentivazione dell'uso di fonti rinnovabili, ma in particolare da una progettazione degli interventi attenta ed efficiente nel rapporto dell'uomo con l'ambiente circostante.

Sempre più spesso ricorrono termini come la bioarchitettura, la bioedilizia, il costruire sostenibile o addirittura il feng shui. Esse costituiscono l'insieme delle discipline che attuano e presuppongono un atteggiamento ecologicamente corretto nei confronti dell'ecosistema antropico - ambientale. In una visione caratterizzata dalla più ampia interdisciplinarietà e da un utilizzo razionale e sostenibile delle risorse, la bioarchitettura tende alla conciliazione ed all'integrazione delle attività e dei comportamenti umani con le preesistenze ambientali ed i fenomeni naturali, al fine di realizzare un miglioramento della qualità della vita attuale e futura.

L'obiettivo è quello di instaurare un rapporto equilibrato tra l'ambiente ed il costruito, soddisfacendo i bisogni delle attuali generazioni senza compromettere, con il consumo indiscriminato delle risorse, quello delle generazioni future.

Alcuni dei principi progettuali alla base di tali filoni sono:

- ottimizzare il rapporto tra l'edificio ed il contesto nel quale viene inserito. Compito del progettista, come afferma Christian Norberg-Schulz, è creare luoghi significativi

per aiutare l'uomo ad abitare, attraverso la comprensione ed il rispetto del *genius loci* – lo spirito del sito;

- privilegiare la qualità della vita ed il benessere psico-fisico dell'uomo;
- salvaguardare l'ecosistema;
- impiegare le risorse naturali (acqua, vegetazione, clima);
- non causare emissioni dannose (fumi, gas, acque di scarico, rifiuti);
- prevedere un diffuso impiego di fonti energetiche rinnovabili;
- utilizzare materiali e tecniche ecocompatibili, preferibilmente appartenenti alla cultura materiale locale.

L'illuminazione naturale costituisce una risorsa importante per la progettazione e la realizzazione di edifici energeticamente sostenibili e qualitativamente confortevoli.

Un'adeguata illuminazione diurna ed una **integrazione ottimale di luce naturale/artificiale** possono contribuire in maniera significativa al **risparmio energetico** negli edifici.

La presenza di **luce naturale** in un ambiente di lavoro influisce sulla **soddisfazione**, sulla **prestazione** e, quindi, anche sulla **produttività dell'utente**.

Al contempo, **una disponibilità di luce naturale particolarmente elevata in un ambiente chiuso può creare alcuni svantaggi:**

- **Per le condizioni climatiche**, infatti un elevato irraggiamento comporta un incremento notevole dei carichi frigoriferi e quindi un conseguente incremento del fabbisogno energetico in fase di climatizzazione.
- **Per le condizioni visive ottimali**, sia per le reazioni di ordine psicologico che si avrebbero per effetto di un eccesso di luce diretta, sia per la variabilità nel tempo delle caratteristiche proprie della luce naturale.

Il panorama scientifico internazionale presenta approfondite ricerche finalizzate alla individuazione ed all'analisi dei vantaggi e degli svantaggi della luce naturale negli ambienti confinati. Di riflesso, anche il quadro normativo internazionale, europeo e nazionale, negli anni si è allineato con l'emanazione di direttive e linee guida per progettisti e tecnici del settore. Ed allo stesso modo, anche l'industria ha sviluppato

tecnologie e prodotti innovativi per il controllo e l'ottimizzazione dell'uso della luce naturale per fini energetici e di comfort.

Tuttavia, esistono ancora alcune difficoltà tecniche e scientifiche da risolvere prima che la metodologia d'impiego dell'illuminazione naturale possa raggiungere il livello delle procedure routinarie della progettazione.

Una delle priorità è l'approfondimento e la ricerca per rendere applicabili ed affidabili metodi, procedure ed indici di valutazione del comfort visivo in presenza di luce naturale.

Infatti, uno dei problemi che maggiormente si può verificare, in termini di comfort visivo, in ambienti caratterizzati da una significativa illuminazione naturale, è l'abbagliamento. In particolare, l'abbagliamento psicologico, anche detto Discomfort Glare **è l'insieme di sensazioni di fastidio, percepite, indipendentemente dalla possibile, ma non necessaria, riduzione della capacità visiva.**

L'abbagliamento psicologico è causato da un'elevata o non uniforme luminanza all'interno del campo di vista o da eccessivi contrasti di luminanza della sorgente abbagliante (finestra), sia con le pareti adiacenti, sia con il soffitto e il pavimento. Numerosi studi hanno dimostrato che esso dipende dalla posizione della sorgente abbagliante, dalle sue dimensioni e dalla porzione di cielo che attraverso essa viene vista.

L'attività di ricerca si è focalizzata su analisi e valutazioni, da un lato di carattere energetico riguardo un'integrazione ottimale di luce naturale/artificiale, come previsto anche dal più attuale quadro normativo europeo (EN 15193 : 2007), dall'altro sul comfort visivo in presenza di luce naturale, attraverso il confronto di un indice di valutazione dell'abbagliamento da luce naturale, il DGI, con i risultati di valutazioni percettive in situazioni reali di abbagliamento da luce naturale, al fine di trarne utili elementi per chiarirne applicabilità e limiti e prospettare eventuali modifiche.

Il primo capitolo tratta della necessità della luce naturale per la vita e per lo svolgimento delle attività umane, evidenziandone vantaggi e svantaggi, soprattutto riguardo il contributo al risparmio energetico ed al comfort visivo.

Nel secondo capitolo viene descritta la prima fase di studio, che ha visto:

- L'approfondimento del panorama scientifico internazionale e dello stato dell'arte della ricerca sulla luce naturale, con particolare riferimento al risparmio energetico ed al comfort visivo.
- Lo sviluppo e la messa a punto di un sistema innovativo, che sfrutta la tecnica dell'analisi in ampio range dinamico (HDR – High Dynamic Range), per la misura in campo delle grandezze fotometriche e geometriche del campo di vista. Sistema utile alla valutazione del comfort degli ambienti confinati.

Nel terzo capitolo si descrive l'utilizzo del sistema messo a punto per la valutazione ed il confronto di situazioni reali specifiche, già analizzate da altri ricercatori, attraverso prove reali percettive eseguite su soggetti campione.

Nel quarto capitolo si riportano le conclusioni del lavoro sulla base di analisi ed interpretazioni dei risultati ottenuti relativi sia al contributo energetico, sia al comfort visivo da luce naturale.

In breve, si sono ottenuti i seguenti risultati:

- Per l'aspetto energetico, con riferimento alla norma EN 15193 : 2007, si è verificato che è possibile ridurre i consumi, non solo attraverso il contributo della luce naturale, ma tenendo conto di due aspetti distinti:
 - l'effettiva presenza di individui nei locali (fattore di occupazione);
 - la presenza di un sistema di controllo ad illuminamento costante.

La norma orienta verso una migliore qualità degli impianti, sia per il risparmio energetico, sia per il comfort visivo, ma la procedura proposta per la valutazione del contributo della luce naturale risulta estremamente semplificata e dunque poco accurata rispetto ad altre metodologie più rigorose utilizzate da software di simulazione in quanto, non si tiene conto delle caratteristiche ottiche delle superfici interne e delle ostruzioni esterne, ed anche la modellazione geometrica di tali ostruzioni risulta approssimativa.

- Per l'aspetto del comfort visivo, si sono confrontati i risultati ottenuti dall'applicazione del DGI (Daylight Glare Index), con i risultati riportati da altri indici, quali il DDG (Degree of Discomfort Glare) che tiene conto delle reali sensazioni di discomfort dei soggetti coinvolti nelle valutazioni.

L'analisi e l'interpretazione dei risultati ottenuti hanno evidenziato i limiti di applicabilità e di affidabilità del DGI. Si sono apportate opportune modifiche, verificandone lo scostamento dai risultati di valutazioni percettive reali. Dopo specifiche considerazioni riguardo i valori di luminanza da considerare, si è fissata per la finestra una luminanza uniforme pari al valore medio di luminanza, ponderato secondo gli angoli solidi e si sono ottenuti risultati per il DGI più vicini a quelli forniti dal DDG.

1. LA DOMANDA DI LUCE NATURALE NEGLI AMBIENTI CONFINATI: PRINCIPALI VANTAGGI E SVANTAGGI

Introduzione

La visione umana è il frutto di un adattamento, sviluppato nel corso di millenni, alla luce proveniente dal sole e dal cielo. Da ciò deriva l'importanza dell'illuminazione naturale per i diversi tipi di attività ed i problemi psico-fisici connessi allo svolgimento di compiti visivi in condizioni di illuminazione artificiale. Tale problematica è ancor oggi attuale, anche se le capacità visive che l'uomo ha sviluppato nel passato erano finalizzate essenzialmente alle attività all'aperto, che ben poco hanno in comune con quelle di una società civilizzata, svolte in ambienti statici, all'interno di edifici, ed al riparo dagli agenti esterni.

Non esistono, purtroppo, semplici regole atte a garantire, per qualunque tipo di attività, una buona illuminazione in uno spazio confinato. Infatti, le aperture dell'involucro edilizio, che consentono alla luce di penetrare negli ambienti confinati, dovrebbero essere proporzionate e distribuite in modo da assicurare, nelle diverse ore del giorno, una confortevole ed efficiente distribuzione della luce naturale, evitando fenomeni critici di abbagliamento e/ o di irraggiamento.

L'impiego della luce naturale impone, in fase progettuale, uno studio approfondito di soluzioni, valutate in base alle esigenze visive (le attività da svolgere e quindi i compiti visivi), alle caratteristiche architettoniche e funzionali degli spazi, al benessere termico e visivo degli occupanti, senza trascurare il comportamento energetico dell'edificio, quando luce naturale e luce artificiale si integrano anche attraverso l'utilizzo di sistemi di controllo automatizzati.

Le condizioni di comfort visivo costituiscono il presupposto per una progettazione ottimale, sia per la luce artificiale, sia per quella naturale. Quest'ultimo caso, però, risulta essere più complesso sotto il profilo progettuale e gestionale. Infatti, l'illuminazione naturale, a differenza di quella artificiale, non può essere controllata, né fissata dal progettista: essa varia sia in distribuzione, sia in intensità, in funzione del clima e delle stagioni. Inoltre, è necessario tenere conto delle caratteristiche architettoniche dell'edificio, del suo orientamento, di quello delle superfici trasparenti e, in prossimità di queste, della presenza di edifici o di altri tipi di ostruzioni.

È solo negli ultimi decenni, d'altra parte, che i principi della fotometria ed alcune delle procedure di calcolo caratteristiche dell'illuminotecnica delle sorgenti artificiali, sono stati estesi anche all'illuminazione naturale. In precedenza, infatti, non erano possibili valutazioni quantitative. Le considerazioni dei progettisti relativamente all'illuminazione naturale, per secoli, non si sono discostate molto da quelle esposte da Vitruvio, sul posizionamento delle finestre e sugli effetti visivi all'interno. Per la verità un approccio quantitativo più preciso scaturì da esigenze di carattere legale, dal bisogno cioè di definire i rapporti di vicinato tra le costruzioni, in termini di ostruzioni alla vista e della possibile reciproca limitazione nell'illuminazione connesse alla presenza di edifici adiacenti.

Il problema principale fu quello di determinare l'illuminamento sul piano di lavoro, mentre successivamente, e soprattutto negli ultimi anni, si è evidenziata la possibilità di assegnare un significato numerico anche agli aspetti soggettivi connessi all'impiego di luce naturale, quali l'abbagliamento, l'attenzione e la distrazione negli operatori. L'approccio quantitativo ad una materia soggettiva ha incontrato una pronta risposta da parte dei progettisti, poiché consentirà di esprimere, in termini numerici, alcuni importanti aspetti soggettivi che altrimenti risulterebbero incommensurabili.

1.1. La luce naturale e l'occhio

Si può dire che la luce sia la coscienza dell'esistenza della realtà. Il mondo esiste in quanto lo sentiamo, lo tocchiamo ma soprattutto lo vediamo. Eppure la luce non è tangibile. La luminosità, il colore e quindi l'apparenza delle cose sono solo l'effetto prodotto sulla retina da una particolare forma di energia nota con il nome di **radiazione elettromagnetica**.

Ciò che realmente esiste è l'energia elettromagnetica, mentre la luce può essere definita un'invenzione del sistema occhio-cervello che cattura l'energia radiante emessa in un determinato intervallo di lunghezze d'onda per trasformarla in sensazione visiva.

Come una normale lampada costituisce una sorgente di luce nell'illuminazione artificiale, così **il sole è la nostra sorgente di luce naturale**. La sua luce ci arriva in modo diretto o indiretto, attraverso il fenomeno di "scattering" nell'atmosfera e riflessa dalle superfici dell'ambiente. Di conseguenza, il sole, il cielo, la superficie terrestre, le piante e gli edifici possono diventare sorgenti di luce naturale.

La luce naturale, a differenza di quella artificiale, ha la caratteristica fondamentale di cambiare da istante a istante e presenta una specifica temperatura di colore ed una propria efficienza luminosa. La direzione della radiazione solare è caratterizzata dall'angolo solare azimutale, dall'altezza solare e dall'azimut solare. Il valore di illuminamento prodotto dal sole su una superficie orizzontale non ostruita può variare da 0 a circa 100.000 lux. La temperatura di colore della luce solare diretta è di circa 3.000 K quando il sole è prossimo all'orizzonte, e circa 5.800 K quando il sole è prossimo allo zenith e l'efficienza luminosa dipende dall'altezza solare: il suo valore parte dallo 0 all'orizzonte e cresce in maniera uniforme fino ad una altezza di 20°; al di sopra di quest'angolo il valore è di circa 105 lm/W. Nei luoghi all'aperto in ombra, ossia al riparo dalla radiazione solare diretta, la luce solare arriva dopo aver subito la riflessione diffusa attraverso l'atmosfera e sui corpi circostanti.

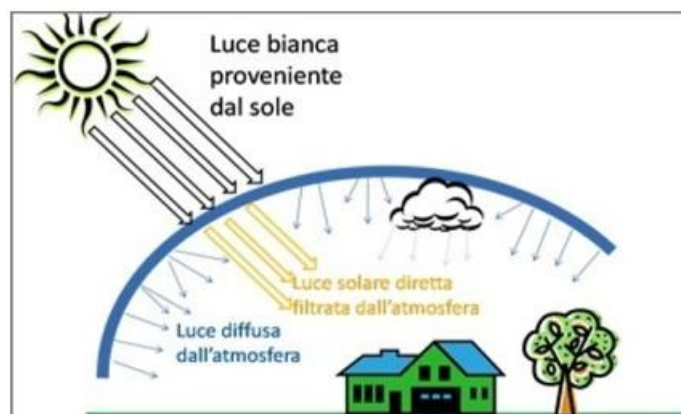


Figura 1 - Componenti della luce naturale

La composizione spettrale di questa radiazione è variabile a seconda della presenza di pulviscolo e nubi nell'aria e risente anche della presenza di edifici, monti, alberi etc. In generale la luce solare indiretta ha una colorazione che tende all'azzurro e la sua temperatura di colore è superiore a quella della radiazione diretta.

La luce solare diretta illumina soltanto una parte degli ambienti ed esiste una netta linea divisoria tra la parte soleggiata e la restante: per questa ragione, l'illuminamento negli ambienti confinati può essere irregolare ed il contrasto di luminanze, se significativo, può causare abbagliamento. A causa di questi effetti indesiderati della luce diretta spesso è necessario utilizzare schermature o sistemi che permettano di controllare l'ingresso di luce naturale negli ambienti.

L'occhio costituisce il sensore recettivo delle radiazioni elettromagnetiche emesse nel "campo del visibile". Il principio di funzionamento dell'occhio è molto simile a quello della macchina fotografica: esso contiene una lente (il cristallino) che rimanda alla superficie posteriore interna (la retina) un'immagine ridotta e capovolta di un oggetto distante (Figura 2). La retina è costituita da più di cento milioni di terminazioni nervose sensibili alla luce: i **bastoncelli** e i **coni**. I primi sono fortemente sensibili alla luce e responsabili della percezione della forma e del movimento e non riescono a rilevare i colori. I coni invece sono meno sensibili alla luce ma distinguono i colori e consentono di percepire anche il dettaglio delle immagini. La divisione tra i coni e i bastoncelli spiega le principali caratteristiche dell'occhio umano. In condizioni di poca luce i coni non operano; la visione è allora affidata ai soli bastoncelli e l'immagine è a bassa definizione e senza colori (visione scotopica). Se la quantità di luce è sufficiente,

operano i coni, e la visione è detta fotopica. La sensibilità dell'occhio alle diverse lunghezze d'onda non è uniforme e differisce a seconda che si tratti di visione fotopica o scotopica.

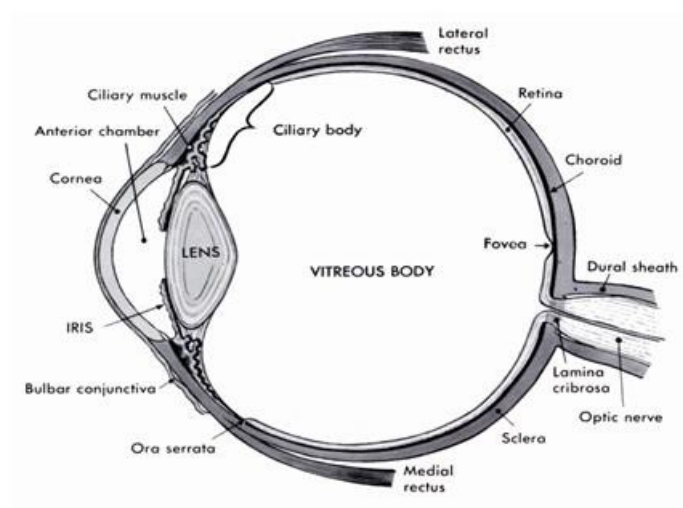


Figura 2 - Sezione longitudinale del globo oculare

In generale, una corretta illuminazione in tutti gli ambienti confinati, sia essa naturale o artificiale, è importante sotto vari punti di vista: per la salubrità degli ambienti, per lo stato psichico, per un rendimento ottimale nello svolgimento di attività, per l'igiene dell'organo visivo.

La funzione visiva si esplica senza affaticamento e senza conseguenze dannose quando l'ambiente si trova in condizioni ottimali di illuminazione; in tal caso, anche per lavori che richiedono un grosso sforzo visivo, la fatica si manifesta dopo più tempo. Un'illuminazione impropria, tanto per difetto, quanto per eccesso produce un rapido affaticamento ed anche conseguenze tardive spesso irreparabili.

La scarsa illuminazione porta ad avvicinare l'occhio al lavoro da eseguire a meno di quei 30-35 cm che rappresentano la distanza normale; ne conseguono disturbi dell'accomodazione e della convergenza, che conducono rapidamente alla stanchezza, la quale si manifesta con fenomeni generali, quali pesantezza del capo o cefalea, o dolori locali, consistenti in senso di bruciore all'occhio, diplopia transitoria e nistagmo.

Quando il lavoro in condizioni di deficiente illuminazione diviene abituale, nei soggetti predisposti può generarsi lo stato di miopia. La scarsità di luce, i caratteri troppo piccoli, le cattive posizioni ed il lavoro eccessivamente prolungato possono

determinare i sintomi dell'astenopia, uno stato avanzato del semplice affaticamento dell'occhio, caratterizzato da un frequente ammiccamento palpebrale, dal senso di bruciore nell'occhio e dall'aumento di lacrimazione.

La luce naturale, nello specifico, offre i seguenti vantaggi:

- La qualità dell'illuminazione è migliore, poichè l'occhio umano si è sviluppato con la luce naturale.
- Più alti valori di illuminamento, rispetto alla luce artificiale. L'efficacia luminosa della luce diurna è paragonabile solo alle migliori risorse di illuminazione artificiale.
- La luce diurna è energia rinnovabile.
- Un buon progetto di illuminazione naturale può fornire l'illuminamento richiesto per l'80 - 90% delle ore di luce diurna, permettendo il risparmio di una considerevole parte di energia che altrimenti sarebbe necessaria per l'illuminazione artificiale.
- Il continuo cambiamento della quantità di luce diurna è favorevole in quanto ha un effetto stimolante e significativo per il ritmo circadiano.

Allo stesso tempo bisogna tener conto anche degli svantaggi che l'illuminazione naturale comporta, quali:

- Surriscaldamento estivo per irraggiamento diretto.
- Abbagliamento.
- Impossibilità di controllare le ombre.
- Perdite di calore attraverso i componenti finestrati (consumi energetici maggiorati).
- Eccessivi condizionamenti sulla progettazione.
- Inadeguata penetrazione in profondità della luce e conseguente disuniformità degli illuminamenti.

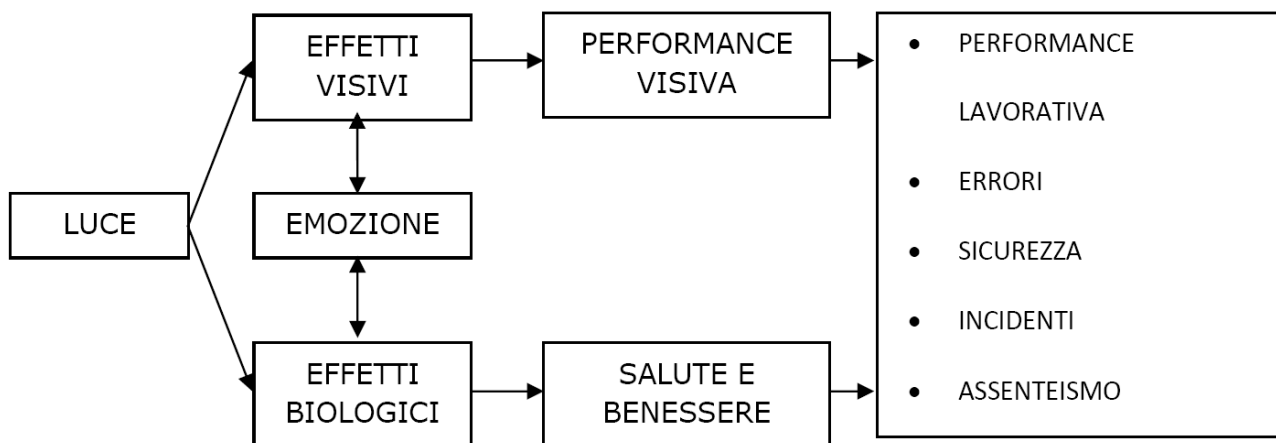
1.2. La domanda di luce naturale per le diverse attività svolte negli ambienti confinati

Numerosi studi hanno dimostrato che la luce in generale, sia artificiale, sia naturale, oltre che un effetto visivo, ha un'importanza fondamentale per la salute umana, per l'attenzione, la vivacità ed anche per il dormire [1, 2, 3].

Gli effetti visivi della luce e le rispettive conseguenze di ordine pratico sono oggetto di ricerca da più di 500 anni. Già Leonardo da Vinci descrisse alcune idee circa l'illuminazione delle strade e realizzò alcuni schizzi sulla connessione tra gli occhi ed il cervello; J. W. Goethe analizzò gli effetti della luce sulla resa cromatica.

Nel 1722 Antony van Leeuwenhoek individuò i coni ed i bastoncelli nella retina dell'occhio umano. Tale scoperta permise di capire molti degli effetti della luce sulla visione, già precedentemente individuati, ma non spiegati. Per più di 150 anni gli scienziati hanno considerato coni e bastoncelli come gli unici fotorecettori dell'occhio, fino a quando, nel 2002, David Berson individuò un nuovo tipo di fotorecettore per la regolazione degli effetti biologici della luce. Quando la luce raggiunge tali cellule, si verifica una complessa reazione chimica che coinvolge la melanopsina producendo impulsi elettrici per il cervello. Sulla base di ulteriori studi, alcuni ricercatori sono riusciti addirittura a correlare la riduzione di melatonina con la curva fotopica di sensibilità visiva [4].

Altre ricerche recenti hanno dimostrato che la luce incidente sulla parte superiore della retina ha un effetto biologico differente da quella incidente sulla parte inferiore [5]. La luce che raggiunge l'occhio dall'alto e che arriva alla parte inferiore della retina sembra avere un effetto biologico maggiore rispetto alla luce che raggiunge l'occhio dal basso. Tali risultati suggeriscono una maggiore sensibilità o una distribuzione più densa del nuovo tipo di fotorecettori nella parte inferiore della retina. Ciò, in perfetto accordo con la distribuzione spaziale della luce e a conferma della notevole importanza fisiologica e psicologica della luce naturale [6].



La luce naturale ha sempre avuto un ruolo importante, sia dal punto di vista estetico e simbolico che in relazione al comfort visivo ed all'illuminazione funzionale.

Dal punto di vista storico in Europa, la conoscenza di tecniche e l'attenzione alla progettazione architettonica mirata all'utilizzo della luce diurna negli edifici è stata utilizzata fin dai romani; già Vitruvio discuteva nei suoi scritti classici come provvedere ad una buona illuminazione naturale. Nel medioevo ed in epoca barocca, in edifici sacri, la luce era utilizzata addirittura come elemento espressivo; fino alla Rivoluzione Industriale, quando la ricerca sull'illuminazione naturale è stata potenziata attraverso le innovazioni tecnologiche come ad esempio le nuove tecniche per la produzione di vetro.

Attualmente, sia per edifici ad uso residenziale che per quelli ad uso commerciale o industriale, esistono molti motivi che orientano verso l'impiego dell'illuminazione naturale.

- *La qualità della radiazione visibile*

Uno degli aspetti che caratterizza la qualità della luce naturale è il *rendimento del colore*.

L'occhio umano si adatta facilmente ad ogni sorgente luminosa, ma la percezione del colore può variare con la composizione spettrale della luce proveniente dalla sorgente. Ne consegue che gli oggetti possono cambiare colore al variare della luce che li investe.

Dalle indagini sistematiche condotte al fine di analizzare i motivi per cui la luce naturale è preferita rispetto alle sorgenti artificiali, già nel 1967 Markus verificava che il 95% di individui intervistati preferiva la luce naturale [7].

Cuttle, nei suoi studi condotti su soggetti inglesi e della Nuova Zelanda, verificò che quasi il 99% preferiva ambienti di lavoro con finestre e che l'86% preferiva l'illuminazione naturale. La preferenza per l'illuminazione naturale era dovuta ad un minor affaticamento e discomfort rispetto ai casi con sola luce artificiale. [8].

Heerwagen e Heerwagen attraverso delle interviste agli occupanti di alcuni uffici a Seattle, USA, nella stagione invernale ed estiva, verificarono che più della metà degli occupanti ritenevano la luce naturale migliore per il comfort psicologico, per l'aspetto dell'ambiente, per la salute in generale, per il benessere visivo e per la resa cromatica degli oggetti [9].

Più di recente, Galasiu et al. hanno verificato, sulla base di interviste condotte tra studenti e lavoratori, che la maggior parte di essi, tra il 65% ed il 78% considera l'illuminazione naturale nettamente migliore rispetto a quella artificiale, sia per benefici di carattere psicologico, sia di ordine produttivo (resa cromatica) [10, 11, 12, 13, 14].

- *L'importanza della luce naturale come elemento di progetto*

La luce naturale è un importante elemento di progetto, dato che fornisce agli ambienti confinati una particolare sensazione di spazialità, dovuta al fatto che le superfici trasparenti, collegando gli ambienti confinati con l'esterno, fanno apparire i primi più ampi. Il senso dello spazio, benché sia prodotto essenzialmente dalla percezione visiva di un ambiente, è un fenomeno che è stato a lungo oggetto di ricerca. Già Inui e Miyata negli anni '70 asserivano che esso è maggiore per ambienti con ampie finestre [15], ed un ambiente che viene percepito come spazioso è più gradevole.

La luce proveniente dal sole e dal cielo aggiunge dinamica alle condizioni d'illuminazione di un ambiente, poiché produce variazione nel tempo di colore, contrasto e luminanza. Tale caratteristica non può essere raggiunta da nessun altro elemento di progetto e difficilmente può essere efficacemente simulata utilizzando le sorgenti artificiali.

Boubekri et al. scoprirono, da alcune ricerche condotte in ambienti di lavoro, che la dimensione ottimale dell'area investita da luce solare diretta di una stanza risultava essere circa il 25% dell'area totale del piano, con una dimensione massima ammissibile del 40% [16].

- *La comunicazione visiva con l'esterno*

Un importante beneficio delle superfici trasparenti in un involucro edilizio è che esse rappresentano i canali di comunicazione visiva con l'esterno, offrendo una veduta agli occupanti di un edificio [17, 18, 19]. In esperimenti condotti in ambienti senza finestre, gli occupanti, nella maggior parte dei casi, manifestavano desiderio di contatto con l'esterno.

In un'ampia ricerca, Markus ha accertato le preferenze in proposito di circa 400 impiegati d'ufficio di Bristol [20, 21]. Circa il 70% di essi ha definito la propria veduta "buona", ed il 25% "adeguata". Un'ampia maggioranza (circa l'88%), preferisce la vista di una città o di un paesaggio lontano, mentre solo il 12% la visione del solo cielo e degli edifici circostanti. Molti degli intervistati, il cui posto di lavoro era lontano dalle finestre, hanno manifestato il desiderio di essere collocati più vicino ad esse. Markus ha inoltre verificato sperimentalmente che in una lista dei fattori ambientali il bisogno della comunicazione visiva con l'esterno e perfino quello della luce naturale è considerato poco importante per coloro che già godono di tali condizioni, mentre per coloro che ritenevano la luce naturale del loro ambiente di lavoro insufficiente o la veduta poco gradevole, hanno collocato tali fattori ai primi posti della lista.

Ne'eman ed Hopkinson [22] hanno condotto un'analisi finalizzata alla determinazione della percentuale minima di superficie di una parete che occorre vetrare per consentire una adeguata vista all'esterno. Circa il 50% dei soggetti intervistati ha asserito che le superfici delle aperture devono essere tali da uguagliare almeno il 25% dell'intera parete su cui sono collocate, mentre l'85% dei soggetti giudica adeguate delle aperture che coprono il 35% del muro. Inoltre, se l'apertura non è unica, ma sono possibili delle aperture multiple, allora esse devono tutte ricadere entro un cono ottico dell'ampiezza massima di 60°.

Keighley ha analizzato la reazione di individui collocati in ambienti in cui le finestre ricoprivano solo il 20% della parete, ed ha riscontrato insoddisfazione da parte della quasi totalità [23, 24]. Sempre per la stessa percentuale di vetratura si è notato che, nel caso in cui la larghezza dell'apertura è molto maggiore della sua altezza, allora la condizione viene considerata più accettabile. Infatti, una finestra molto larga consente la vista di un panorama più ampio, sebbene la visione del cielo o del suolo si restringa. Analizzando il possibile raggruppamento di tali ampie aperture, si è notato che i soggetti non gradivano tale configurazione. Anche l'impiego di molte piccole finestre, di differenti forme non è stato giudicato gradevole dai soggetti intervistati, mentre la combinazione di finestre di differenti dimensioni si è rivelata non pratica in ogni situazione in cui l'ingresso della luce naturale nello spazio confinato rappresentava un importante criterio di progetto.

Secondo studi più recenti [25], le dimensioni e la forma ottimali delle finestre dipendono fortemente dalle caratteristiche culturali e dalle condizioni climatiche ed al variare del paese in esame la richiesta di superfici vetrate è sensibilmente diversa.

Leather et al. hanno condotto una ricerca riguardo la visione e la quantità di luce solare diretta fornita dalle finestre di un'azienda europea. I soggetti partecipanti dovevano compilare alcuni questionari circa lo stress lavorativo, la soddisfazione ed il comfort. Il risultato fu che le persone che lavoravano in presenza di maggiori aperture verso l'esterno registravano una maggiore soddisfazione lavorativa, un maggior comfort ed una minore intenzione a lasciare il proprio lavoro [26].

Una ricerca condotta da Christoffersen et al. su 20 edifici danesi con le postazioni di lavoro posizionate ad una distanza massima di 7 m dalle finestre mostrò una maggiore preferenza per posizioni più vicine alle aperture verso l'esterno. "L'essere un mezzo di contatto con l'esterno" era l'aspetto più positivo della finestra, seguito dalla possibilità di poter osservare il tempo meteorologico e di poter aprire la finestra per incrementare la ventilazione naturale [27].

1.3. *Aspetti fisiologici e psicologici della luce naturale*

I motivi più significativi per utilizzare la luce naturale sono di ordine fisiologico e psicologico [28]. Gli esseri umani hanno un basilare bisogno di aperture verso l'esterno nell'ambiente in cui vivono, perché queste costituiscono il mezzo attraverso cui si comunica con l'ambiente circostante e non solo il mezzo attraverso cui passa la luce [29, 30]. Durante gli anni '60, in Europa e negli Stati Uniti, sono state eseguite alcune ricerche volte a definire gli impatti fisiologici e psicologici che le finestre e le aperture producono sugli individui. Tali studi sono stati ripresi da Collins [31, 32], per poi giungere, con Vischer all'analisi dell'impatto della luce naturale sul benessere fisico e mentale delle persone [33]. Per condurre queste ricerche è stato necessario confrontare le reazioni dei soggetti che operano in edifici con finestre, con quelle di individui che svolgono la propria attività in edifici senza finestre.

Nel 1968 Hollister ha rilevato, in un rapporto per il Greater London Council, che per gli ambienti senza finestre, si riscontrano significative reazioni negative [34]. Nelle abitazioni, sembra esservi un forte bisogno psicologico di luce naturale, ed a tal fine si rivelano sufficienti anche superfici trasparenti di modeste dimensioni [35].

Numerose ricerche sono state condotte in ambienti con diverse destinazioni. Per gli edifici scolastici, secondo alcuni ricercatori, l'illuminazione naturale non sempre rappresenta una condizione favorevole, a meno che il sistema non sia accuratamente progettato, curando i valori degli illuminamenti, delle luminanze e dei guadagni termici, evitando, al contempo, fenomeni di abbagliamento [36, 37, 38].

I benefici psicologici della luce naturale e la funzione delle finestre come canali di comunicazione visiva sono stati ben delineati da Perkins [39] e Burts [40]; essi sostengono che la visione dell'esterno è comunque una stimolante esperienza conoscitiva. Burts ha notato che la presenza di finestre aggiunge una sensazione di spazialità alle aule che risulterebbero altrimenti, opprimenti ed affollate, benché altri ricercatori sostengono che le finestre costituiscono un elemento di distrazione.

Confronti effettuati tra le prestazioni scolastiche, il benessere fisico ed il comportamento degli allievi di classi diverse, alcune con finestre ed altre senza, non hanno mostrato differenze tra i due gruppi. Gli insegnanti, tuttavia, hanno notato modificazioni nel comportamento degli studenti nelle classi senza finestre, tra questi

un minor interesse verso gli stimoli esterni, un atteggiamento esitante ed incerto ed una maggiore aggressività [41].

Le fabbriche senza finestre sono abbastanza diffuse, anche a causa delle necessità connesse ad alcuni processi industriali. La ricerca di Hollister sulle fabbriche svedesi, che furono costruite sottoterra nel 1946, senza alcun varco alla luce del giorno, stabilì che gli impiegati assumono atteggiamenti estremamente negativi, accusano disturbi di varia natura e si assentano frequentemente [34]. Ricerche condotte in Russia e Cecoslovacchia, [42] dimostrano che gli occupanti di aziende senza finestre sono più frequentemente soggetti a disturbi fisici e psichici. Da tali studi si evince che la mancanza di luce naturale ha un maggiore impatto sul benessere sia fisico che mentale.

Per gli edifici destinati ad uffici, gli studi condotti su lavoratrici che operavano in ambienti senza finestre a Seattle, Washington [43], mostrano che circa il 90% esprime insoddisfazione per la mancanza di finestre ed il 55% crede che ciò possa influire negativamente su esse e sul loro lavoro.

La presenza di luce naturale però, a seconda della quantità e della distribuzione qualitativa in un ambiente confinato, può produrre fenomeni compromettenti per il risparmio energetico ed il comfort termico e visivo degli utenti.

Nel primo caso, relativo alla qualità termica e quindi energetica degli ambienti confinati, una significativa presenza di luce solare diretta può incrementare gli apporti di calore per irraggiamento che, in periodi estivi, difficilmente possono essere ridotti da un buon impianto di climatizzazione, provocando un discomfort climatico per gli utenti. Anzi, tali condizioni comportano solo un incremento ulteriore del fabbisogno energetico primario degli edifici, senza ottenere particolari prestazioni di regolazione climatica.

Nel secondo caso, dal punto di vista fisiologico, in particolare in presenza di videoterminali, si può verificare il cosiddetto effetto velo, compromettendo la visibilità dello schermo; dal punto di vista psicologico, si può verificare il fenomeno dell'abbagliamento molesto che, per effetto di elevati contrasti di luminanze nel campo di vista, o per la presenza di sorgenti luminose particolarmente ampie a luminanza

diffusa, a lungo andare può provocare mal di testa o riduzione della produttività del lavoratore.

Le precedenti considerazioni offrono interessanti argomenti di discussione circa la risposta psico-fisica alla presenza di luce naturale negli edifici. In particolare, nel caso di fabbriche o uffici, in presenza di luce naturale si ottiene una riduzione dei casi di assenteismo ed un miglioramento delle prestazioni dei lavoratori, riducendo i costi di gestione, ma una notevole presenza di luce solare diretta potrebbe comportare anche due principali svantaggi: un incremento del fabbisogno energetico e della potenza frigorifera installata, incrementando oltre ai costi di gestione anche quelli di investimento e, proprio dal punto di vista psicologico, situazioni di abbagliamento molesto, per effetto di eccessivi contrasti di luminanza.

Le ragioni per cui l'utilizzo di luce naturale in un edificio sia una priorità, sono molteplici. Tuttavia, sono ancora necessari studi approfonditi atti a definire e mettere a punto metodi analitici e strumenti pratici ed affidabili, affinché tecnici e progettisti del settore siano in grado di eseguire una progettazione ottimale di essa, sia sotto il profilo energetico, sia per il comfort visivo.

Attualmente, un notevole aiuto alle figure professionali impegnate nel settore dell'illuminazione degli ambienti confinati proviene dall'industria dell'elettronica e dei sistemi schermanti. Infatti, innovativi sistemi di convogliamento, adduzione e diffusione della luce naturale, integrati con sistemi di sensori, controllo e regolazione e con le sorgenti luminose di ultima generazione, permettono da un lato una sempre più affinata regolazione del flusso luminoso da luce artificiale, finalizzato alla integrazione con quella naturale per garantire i livelli di illuminamento richiesti, dall'altro una ottimale distribuzione delle luminanze negli ambienti. In tal modo si raggiungono i due obiettivi principali di una integrazione ottimale tra luce naturale ed artificiale: risparmio energetico e comfort visivo e climatico in generale.

In via del tutto preliminare si può dire che sistemi di integrazione del tipo appena descritto permettono di ottenere risparmi energetici fino al 60%-90% rispetto a quelli tradizionali, garantendo al contempo, elevata uniformità di illuminamenti e di luminanze e quindi comfort visivo ottimale per gli occupanti. Inoltre, esistono metodologie ed algoritmi in grado di simulare preventivamente il funzionamento di tali

sistemi ed in fase operativa di impostarne le condizioni per una integrazione che tenga conto soprattutto delle caratteristiche del sito di installazione.

Il paragrafo 1.6 riporta una descrizione più approfondita delle più innovative tecnologie e delle applicazioni eseguite con i relativi risultati sperimentali.

1.4. *Il contributo della luce naturale al risparmio energetico*

Secondo l'International Energy Agency (IEA, 2006), il 19% di energia elettrica in tutto il mondo è consumata per l'illuminazione. Negli ultimi anni si è assistito ad una sempre crescente attenzione da parte dei vari paesi industrializzati nei confronti dell'illuminazione, con varie politiche tese alla riduzione dei consumi, rispettando comunque le esigenze di sicurezza e di comfort visivo: dall'adozione di lampade ad alta efficienza, alla messa al bando di lampade inefficienti, come quelle ad incandescenza, fino all'utilizzo di alimentatori elettronici ad alta efficienza per le fluorescenti, in accordo con la direttiva europea 2000/55/EC (Official Journal of The European Communities, 2000). Con queste finalità, nel 2000 è stato lanciato il Programma Europeo "Greenlight" (The European Greenlight Programme, 2000), che considera quello dell'illuminazione uno dei settori principali su cui puntare per ridurre i consumi energetici ed il conseguente danno ambientale che questi inducono.

L'impiego di luce naturale consente di ridurre in modo significativo i consumi di energia e la richiesta di picco negli edifici commerciali. La direttiva europea 2002/91/CE sulla certificazione energetica negli edifici prevede, oltre al calcolo dei consumi legati al riscaldamento e raffrescamento, anche quello relativo ai consumi di elettricità ai fini dell'illuminazione degli ambienti. Essa ha dato impulso alla emanazione della norma europea EN 15193 del 2007, che introduce un indice, il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator), per la valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici relative all'illuminazione.

In un progetto mirato ad un efficace controllo energetico dell'edificio, la potenza installata per l'illuminazione artificiale deve essere studiata e definita in funzione della disponibilità di luce naturale. È possibile ottenere i livelli di illuminamento richiesti e distribuzioni di luminanze omogenee, utilizzando al meglio la luce naturale. In tal modo il risparmio energetico conseguito sarà frutto non solo di una minore potenza installata per l'illuminazione artificiale, ma anche di una minore quantità di apporti gratuiti di calore per dispersione dalle lampade, influenzando positivamente sul calcolo dei carichi frigoriferi dell'impianto di climatizzazione estiva.

La radiazione di una qualsiasi sorgente di luce, sia essa naturale o artificiale, comporta anche un effetto termico. Esso è particolarmente significativo nel caso di sorgenti a

bassa efficienza come ad esempio quelle ad incandescenza, che non a caso, dal settembre 2009 sono state "vietate".

Anche la radiazione solare, che per circa il 50% è costituita da radiazioni visibili, comporta un guadagno termico per gli ambienti. Poiché la sua efficienza è molto elevata, l'impiego di luce naturale determina, a parità di illuminamenti, non solo un risparmio di energia elettrica, ma anche una riduzione del carico termico in ambiente.

È ragionevole aspettarsi che la luce naturale possa ridurre il consumo di energia elettrica dovuto all'illuminazione in un edificio, ma ciò non significa che l'illuminazione naturale possa sostituire totalmente quella artificiale, bensì che la luce elettrica non deve essere utilizzata quando è presente la luce naturale in quantità sufficiente. Quando la luce naturale non è sufficiente, a causa di condizioni climatiche e dell'ora del giorno, è necessaria l'illuminazione artificiale. In ogni caso, ***l'impiego di luce naturale consente di ridurre maggiormente il consumo energetico globale che quello di picco.***

Notevole impulso, negli ultimi anni, hanno ricevuto, sia nella ricerca, sia nella produzione industriale, sistemi innovativi di integrazione e controllo della luce naturale e di quella artificiale. La crescente disponibilità tecnico-economica di sistemi integrati di automazione impiantistica e la sempre più vasta diffusione di sistemi di automazione degli edifici (BMS – Building Management Systems) creano nuovi scenari per lo sviluppo di tecniche di analisi integrate finalizzate al risparmio energetico [44]. La Building Automation, attraverso sistemi integrati e protocolli di interfaccia tra i vari componenti riconosciuti dalle diverse aziende produttrici, consente la regolazione e la gestione sia degli apparecchi illuminanti e quindi dei flussi di luce artificiale, sia delle schermature, in modo da garantire risparmio energetico e comfort visivo. Ma anche il comfort termico ne trae un vantaggio, infatti, riducendo al minimo l'utilizzo della luce artificiale, si riducono i carichi frigoriferi dovuti agli apporti gratuiti di calore dalle apparecchiature.

A fronte di questi risparmi di costi energetici, deve essere valutata la maggiore spesa per un più complesso sistema di controllo e di integrazione dell'illuminazione artificiale con quella naturale, di eventuali sistemi oscuranti e di altri elementi del sistema di illuminazione diurna, che non fanno parte degli edifici illuminati artificialmente. La

riduzione delle potenzialità dell'impianto di raffrescamento estivo deve essere confrontata con le maggiorazioni dovute alle accresciute potenzialità dell'impianto di riscaldamento.

In definitiva, la progettazione dell'impianto di illuminazione ha origine già nella concezione integrata delle caratteristiche architettoniche del sistema edificio – impianto, prima della definizione del sistema di illuminazione artificiale. Quindi, anche sotto il profilo energetico, risulta necessario uno studio accurato ed approfondito dell'architettura a seconda delle caratteristiche del sito e mezzi pratici ed affidabili per la simulazione di situazioni reali di illuminazione naturale o di integrazione con la luce artificiale.

La corretta valutazione dell'apporto solare (termico e luminoso) richiede necessariamente l'utilizzo di strumenti di calcolo evoluti, oltre che la conoscenza delle dinamiche e delle interazioni energetiche che si sviluppano all'interno del sistema edificio-impianto.

Nell'analisi del possibile impatto energetico dei sistemi di controllo e gestione dell'illuminazione le norme permettono di individuare sia le esigenze prestazionali da soddisfare sia le potenze specifiche dei corpi illuminanti e i software sono utilizzati per dimensionare e simulare il sistema di illuminazione artificiale e valutare la potenza specifica installata. Alcuni software, basandosi su tecniche di simulazione di raytracing (Daysim,...), permettono di calcolare i valori di illuminamento all'interno degli ambienti, sulla base di profili annuali di radiazione solare di un anno tipo, allo scopo di mantenere predefiniti valori di illuminamento in specifiche aree.

È possibile, inoltre, con il supporto di specifici applicativi, definire modelli comportamentali degli utenti [45, 46] come:

- ***Utenza passiva***, in cui la luce rimane accesa durante tutta la giornata lavorativa e la schermatura è parzialmente abbassata nel corso dell'anno per contrastare l'ingresso della componente di luce diretta e con accensione e spegnimento della luce manuale (il controllo della schermatura è manuale).

- **Utenza manuale attiva**, in cui gli occupanti accendono la luce a seconda delle necessità ed abbassano manualmente la schermatura gradualmente durante il giorno, per ostacolare i raggi diretti.
- **Utenza automatizzata**, in cui si prevede il controllo automatico della schermatura e dell'accensione o spegnimento della luce, mediante sensori.

In tal modo è possibile determinare, in base alle tipologie di controllo, i consumi energetici.

I risultati ottenibili sono:

- Il valore medio annuale del fattore di luce diurna, che permette di valutare il corretto utilizzo della luce naturale all'interno degli ambienti, al fine di garantire un'illuminazione diurna ottimale.
- Il valore dell'autonomia di illuminazione che indica in percentuale per quante ore all'anno si riesce ad ottenere il livello minimo di illuminamento richiesto, con la sola illuminazione naturale (UDI – Useful Daylight Illuminance) [47];
- Il fabbisogno annuale di energia elettrica per l'illuminazione artificiale;
- I valori medi dell'illuminamento nei punti oggetto di indagine.

Essi permettono di ottenere un'analisi energetica accurata valutando il potenziale di risparmio energetico e di riduzione delle emissioni di CO₂ in funzione dei sistemi di controllo [48] e delle schermature adottate.

Sistemi di controllo [49] e schermature permettono di ottenere, oltre ai vantaggi relativi al risparmio energetico, anche riduzione di fenomeni di discomfort visivo dovuto ad un eccesso di luce naturale. Un ruolo importante per le finestrature lo giocano i vetri basso-emissivi o con sistemi di schermatura elettrocromici [50].

I sistemi schermanti, sebbene finalizzati alla riduzione della penetrazione della luce diretta [51], permettono comunque di raggiungere livelli di illuminamento sufficienti per svolgere predefiniti compiti visivi. Essi permettono di ottenere una riduzione dei contrasti di luminanze nel campo di vista e di conseguenza, i fenomeni di abbagliamento molesto.

1.5. Il contributo della luce naturale al comfort visivo

Uno degli aspetti principali che coinvolge direttamente l'illuminazione naturale è il comfort. Esso può essere relativo alle caratteristiche termiche oppure a quelle visive di un ambiente confinato. Difatti, mentre con la luce artificiale, in sede di progettazione di un ambiente, è possibile definire e controllare sia i carichi termici dovuti agli apporti di calore gratuiti, sia i valori fotometrici, con la luce naturale, queste caratteristiche non sono definibili, se non attraverso simulazioni accurate e piuttosto complesse. Anzi, in presenza di luce naturale si verificano situazioni sempre transitorie ed indefinibili a priori.

Oltre l'aspetto energetico dell'uso della luce naturale, nel presente lavoro viene approfondito l'aspetto relativo al comfort visivo ed in particolare il fenomeno dell'abbagliamento, che gioca un ruolo determinante sugli effetti fisiologici e psicologici degli utenti.

L'abbagliamento è l'effetto della luce non desiderata nel campo di vista e spesso è causato dalla presenza di una o più sorgenti con luminosità eccessiva [52].

Si distinguono due fenomeni di abbagliamento:

1. L'**abbagliamento debilitante** o anche **fisiologico** (Disability Glare) – che consiste nel fenomeno di riduzione della capacità visiva dell'utente dovuto a improvvise ed eccessive variazioni del flusso luminoso diretto agli occhi dell'osservatore.
2. L'**abbagliamento molesto** o anche **psicologico** (Discomfort Glare) – che comporta fenomeni di fastidio, di riduzione del comfort e della producibilità degli utenti, indipendenti dalla eventuale, ma non necessaria, riduzione della capacità visiva. Esso può essere causato dalla presenza di sorgenti di luce naturale (finestre) che invadono il campo di vista con elevati e disuniformi gradienti di luminanze.

A questi si aggiungono altri fenomeni, come l'effetto velo che, a causa della presenza di elementi a loro volta illuminanti (videoterminali o schermi), riducono la visibilità degli stessi.

L'abbagliamento molesto è, forse, il fenomeno più complesso da analizzare e da valutare, ma anche il più interessante, dato che gli altri fenomeni, con semplici regole di progettazione possono essere evitati o corretti.

I numerosi studi condotti sull'abbagliamento molesto hanno verificato che la causa principale risiede nella presenza all'interno del campo di vista di elevati e disuniformi gradienti di luminanza. Difatti, le variabili fotometriche e geometriche che influiscono maggiormente sull'abbagliamento molesto sono:

- La luminanza della sorgente;
- La luminanza dello sfondo (luminance of the background);
- L'ampiezza della sorgente (valutata attraverso l'angolo solido);
- La posizione della sorgente rispetto all'asse di vista (valutata attraverso l'*indice di posizione di Guth*).

All'aumentare della luminanza e della dimensione della sorgente, aumenta la sensazione di abbagliamento molesto, mentre essa diminuisce all'aumentare della luminanza dello sfondo (background) ed all'aumentare della distanza della posizione della sorgente rispetto all'asse di vista [53].

Tuttavia, alcuni studi hanno dimostrato come la sensazione di abbagliamento molesto possa dipendere anche dalle caratteristiche del paesaggio fuori della finestra [54, 55] e che la sensazione reale può variare a seconda delle etnie e delle culture. In particolare, uno studio condotto da Cheung e Chung [56] evidenzia, attraverso una conjoint analysis (una tecnica utilizzata nel marketing per definire le preferenze dei clienti) quali possano essere le caratteristiche di un ambiente illuminato da sola luce naturale, maggiormente influenti sulla soddisfazione degli utenti e stila una classifica nella quale, al primo posto si trova la qualità della veduta, al secondo la luminosità generale dell'ambiente, al terzo l'impatto energetico e solo al quinto l'abbagliamento percepito.

Interessanti ricerche hanno dimostrato non solo che per lavoratori con videotermini, in presenza di luce naturale si riducono gli effetti di stanchezza della vista, ma anche

che la luce naturale ha un effetto positivo sulla vendita nei centri commerciali o sull'apprendimento nelle scuole [57, 58].

In definitiva, la luce naturale ha un'importanza fondamentale per lo svolgimento delle attività umane e costituisce una valida fonte per il risparmio energetico ma, se non ben progettata, può dare luogo ad effetti opposti e controproducenti.

A tal proposito risultano particolarmente efficienti sistemi schermati o di convogliamento, di adduzione e di diffusione della luce naturale. Ad esempio, sistemi come gli anidolic ceiling permettono non solo di incrementare gli illuminamenti nelle aree più distanti dalla finestra, ma anche di dare maggiore omogeneità alle luminanze, in modo da ridurre i contrasti ed il conseguente abbagliamento molesto.

Allo stesso modo sistemi come scaffali di luce o schermature poste anche all'interno dei doppi vetri (in modo da ovviare a problemi manutentivi) garantiscono un taglio della componente diretta della luce naturale, riducendo i problemi di abbagliamento.

Il seguente paragrafo riporta queste ed altre tecnologie approfondendone vantaggi energetici e di comfort.

1.6. Sistemi di integrazione e controllo della luce negli ambienti confinati per fini energetici e di comfort

Un considerevole progresso negli ultimi decenni si è avuto nello **sviluppo di sistemi di schermatura della luce naturale e nella implementazione di nuove sorgenti di luce artificiale e del relativo controllo**. Essi garantiscono l'uso della luce diurna in sostituzione della luce artificiale, controllando o riducendo l'ingresso della componente diretta, in modo da assicurare un comfort sia termico che visivo.

Nonostante l'uso di componenti innovativi di progetto e nuovi materiali per controllare e ridirezionare la luce diurna, questi sistemi non sono ancora sufficientemente diffusi, sia per motivi economici, sia per la difficoltà del progettista nel proporre un prodotto nuovo ed innovativo, ma non ancora sufficientemente testato per i propri vantaggi in precedenti installazioni.

La luce del giorno può arrivare attraverso le **finestre**, gli **atri** (spazio delimitato lateralmente dalle pareti di un edificio e ricoperto con materiali trasparenti o traslucidi in modo da permettere dall'alto l'ingresso della luce naturale), i **lucernari** (soluzione semplice per illuminare dall'alto edifici di grandi dimensioni disponibile in diverse tipologie: monolitici, termoformati, centinati), gli **scaffali di luce**, "**light-shelves**" (hanno lo scopo sia di proteggere dalla radiazione solare diretta le zone interne prossime ad un'apertura, sia di ridirezionare la luce proveniente dall'alto; esistono tre diverse tipologie di light-shelves: interni, esterni, combinati), i **frangisole** (elementi sia fissi che regolabili e che vengono disposti all'esterno di un'apertura e sono composti da una serie di lame che possono essere di acciaio, alluminio, PVC, legno, ceramica, ecc; a seconda dell'orientamento di queste lame, la radiazione solare può essere intercettata o riflessa nella zona interna), **sistemi trasparenti a prismi** (lastre trasparenti in resine acriliche o vetro, con una faccia piana e l'altra a denti (prismi) di angolazione diversa), **pannelli composti** (composti da due lastre di vetro fra le quali sono collocati materiali o dispositivi atti a migliorare le prestazioni luminose e termiche), **fibre ottiche** (permettono la propagazione della luce attraverso sottili fibre cilindriche in vetro o in plastica), **condotti solari** (utilizzati per condurre fasci di luce solare in zone interne e composti da superfici del condotto ricoperte da materiali molto riflettenti). Ovviamente l'entità dell'illuminazione naturale negli edifici dipende strettamente dalla dimensione e dalla posizione di questi

elementi. Devono trovarsi in una posizione che procuri ai piani di lavoro una buona luce ed una sufficiente illuminazione nelle parti retrostanti dei locali, allo stesso tempo riducendo la componente diretta.

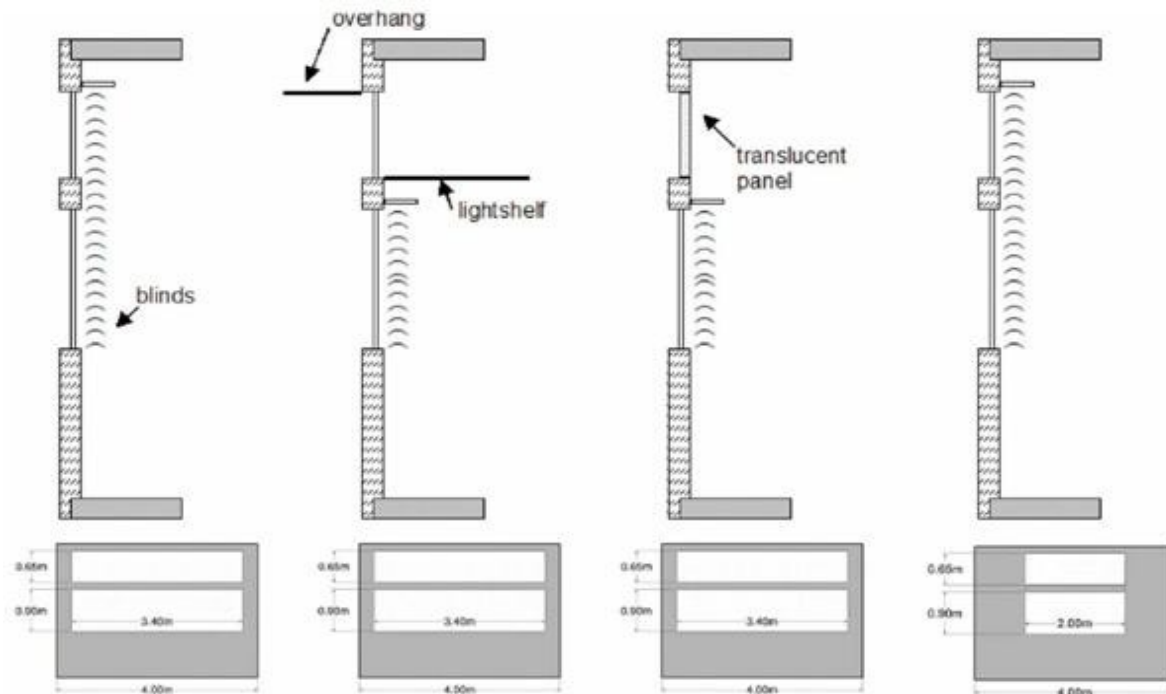


Figura 3 - Schermature e scaffali di luce

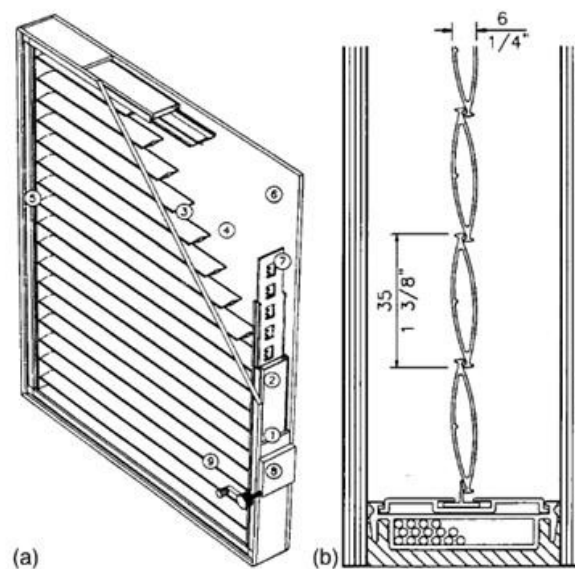


Figura 4 - Vetri con schermature interne

A questi prodotti, che costituiscono sistemi per l'ingresso della luce naturale negli ambienti o per la schermatura della componente diretta, in molti casi si integrano sistemi di controllo automatici e semiautomatici. Questi ultimi possono agire sia sulla regolazione dei flussi luminosi dei corpi illuminanti artificiali presenti negli ambienti, sia sulle stesse schermature, in modo da regolarne la posizione in funzione del sole.

Negli ultimissimi tempi, proprio per ovviare alla mancanza di dati sperimentali e di prove reali su edifici con specifiche destinazioni d'uso, che potessero dare man forte a progettisti e tecnici del settore nel promuovere l'uso di tali prodotti, al fine di un maggior comfort ambientale ed un maggior risparmio energetico, numerosi studi e ricerche sono stati condotti in diverse parti del mondo.

Prefino presso una struttura del New York Times, a New York, per sei mesi è stato condotto un monitoraggio di un sistema integrato di schermatura con lamelle esterne e controllo e regolazione delle sorgenti artificiali interne in funzione degli illuminamenti desiderati e di quelli letti in punti strategici degli ambienti interni. Tale sistema, oltre a dimostrare una elevata affidabilità, ha permesso di ottenere un risparmio fino al 60% dell'energia necessaria per l'illuminazione, senza contare la quota risparmiata per effetto del possibile aumento dei carichi frigoriferi in presenza di apporti gratuiti di calore dai corpi illuminanti (qualora non vi fosse un controllo elettronico) o da irraggiamento diretto (in assenza di schermature). Il beneficio ulteriore relativo al comfort interno, si è avuto per la riduzione dei fenomeni di abbagliamento [60].

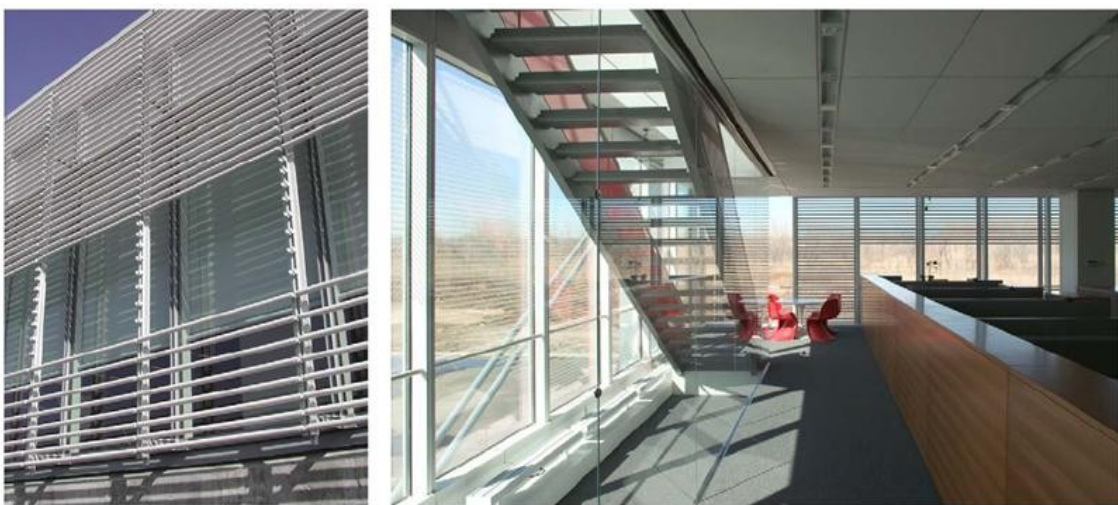


Figura 5 - Viste esterna ed interna degli uffici del New York Times in una simulazione al 23 Febbraio 2004

Il concetto dell'involucro edilizio costituito da componenti e sistemi dinamici introduce un potenziale per una migliore qualità degli ambienti di lavoro e di soluzioni per l'efficientamento energetico.

I sistemi innovativi per l'illuminazione naturale puntano ad incrementare i livelli di uniformità da luce naturale negli ambienti, controllando la componente diretta, per ridurre fenomeni di abbagliamento e di discomfort per gli occupanti [60, 61]. Il controllo simultaneo dei sistemi di illuminazione artificiale e dei componenti dell'involucro edilizio può ridurre al minimo i consumi energetici [62, 63].

Possono anche essere implementati algoritmi che permettono di predefinire i carichi termici e frigoriferi in funzione dei dati climatici, per meglio regolare i sistemi di climatizzazione e ridurre ulteriormente i consumi energetici, mantenendo il comfort climatico [64, 65, 66].

I sistemi schermanti possono essere multiuso: bloccare la luce solare diretta e gli apporti di calore gratuiti durante il periodo del raffrescamento; favorire la massima introduzione di luce naturale negli ambienti, per massimizzare gli apporti gratuiti di calore nella stagione invernale; controllare e ridirezionare la luce del sole, diffondendola nello spazio, senza causare problemi di abbagliamento in condizioni di cielo "clear" ed al tempo stesso trasmettere la quantità massima di luce naturale disponibile in condizioni "overcast".

Sono stati studiati metodi per la simulazione della distribuzione degli illuminamenti da luce naturale negli ambienti ed il controllo della luce artificiale e delle schermature. Tali metodi, date le relazioni di trasmittanza luminosa della finestra e l'angolo di tilt delle schermature per evitare l'abbagliamento, calcolano l'illuminamento da luce naturale nell'istante di tempo definito e definiti i livelli di illuminamento richiesti per gli specifici compiti visivi, i fattori di regolazione e controllo sono valutati in base alle sorgenti di luce artificiale utilizzate. Il risparmio energetico ottenuto con tali metodi ed integrazioni, rispetto ai casi di assenza di sistemi di regolazione e controllo, può superare il 75% in condizioni di cielo "overcast" ed il 90% in condizioni "clear". Inoltre, le schermature bloccano la componente diretta della luce naturale, riducendo i fenomeni di abbagliamento [67].

Ultimissimi sistemi di adduzione della luce naturale negli ambienti confinati e di regolazione della stessa per fini energetici e di comfort sono:

- Gli "anidolic ceiling", ovvero sistemi di convogliamento ed adduzione della componente diretta della luce naturale, con diffusione dall'alto negli ambienti confinati. Essi garantiscono uniformità di illuminamento, anche a distanze elevate dalle finestre e riducono fenomeni di abbagliamento. Inoltre, presentano elevate prestazioni in particolare in siti con latitudine bassa e maggiore frequenza di cielo "clear" [68].

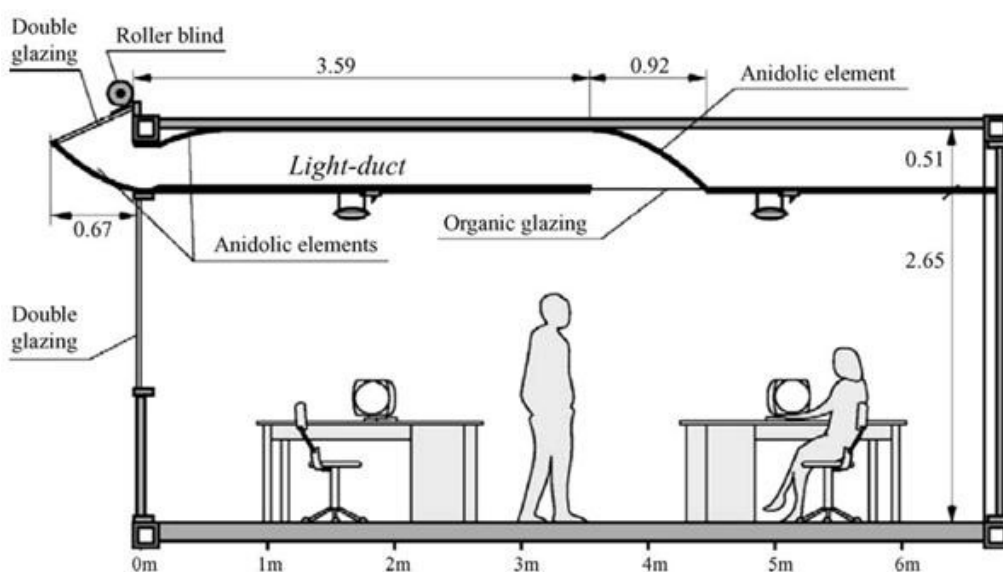


Figura 6 - Un esempio di anidolic ceiling

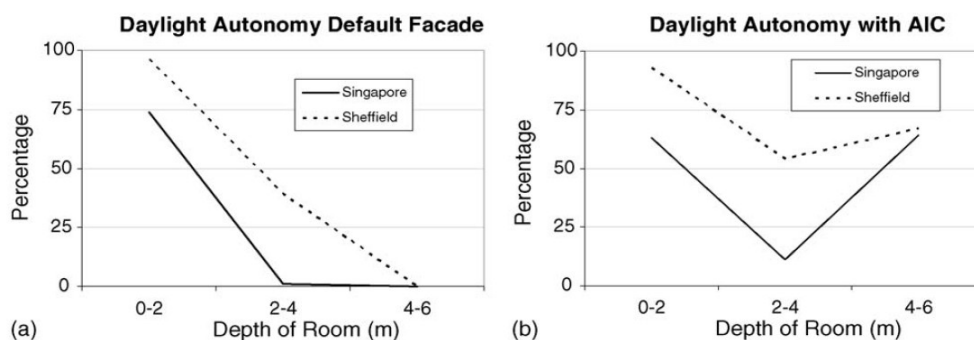


Figura 7 - Confronto della Daylight Authonomy (DA) tra due località (Singapore e Sheffield), in assenza ed in presenza di anidolic ceiling

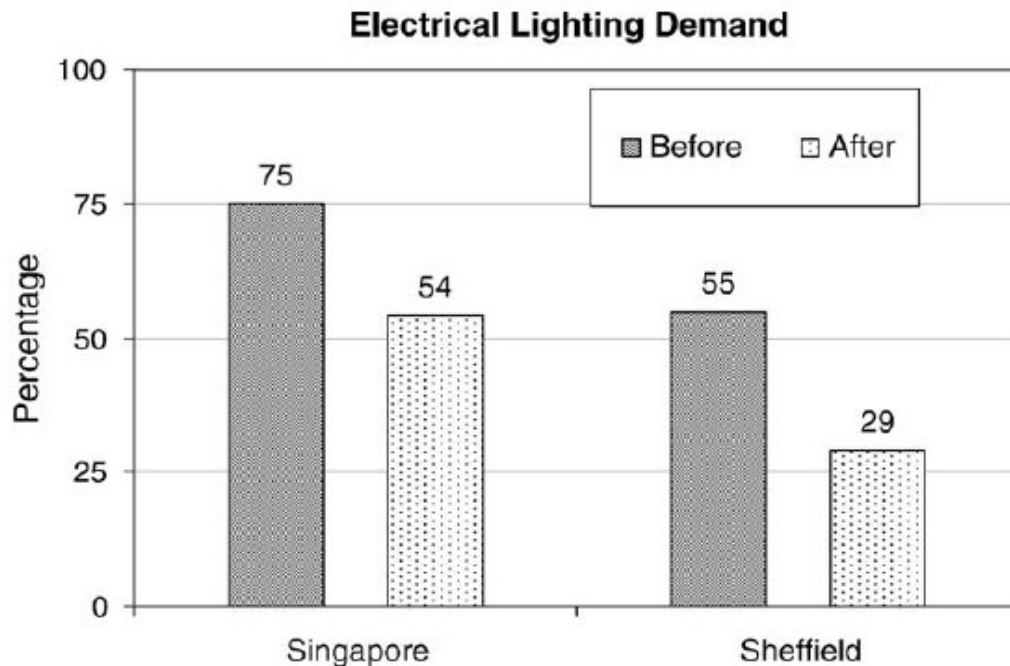


Figura 8 - Fabbisogno di energia elettrica prima e dopo l'installazione di anidolic ceiling

- Le facciate ventilate fotovoltaiche che garantiscono la trasmissione della luce naturale, riducendo fenomeni di abbagliamento, l'irraggiamento dovuto alla componente diretta ed incrementando la produzione di energia elettrica da fonte fotovoltaica, attraverso la ventilazione naturale dei pannelli (che riduce le perdite di efficienza per elevate temperature) che sicrea nell'intercapedine con la parete, per effetto dei moti convettivi [69].

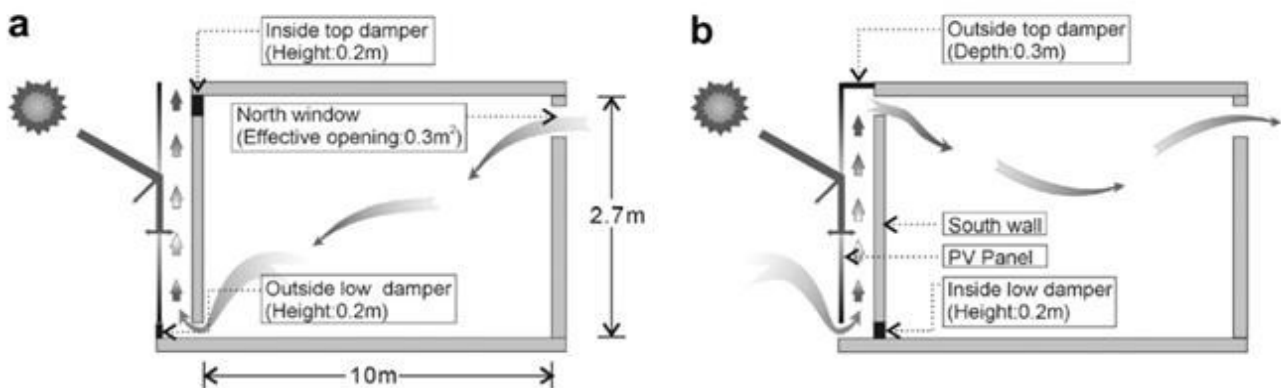


Figura 9 - Illustrazione del funzionamento di una facciata ventilata fotovoltaica nella stagione estiva ed invernale

- Sistemi integrati di vetri elettrocromici e scaffali di luce. I primi costituiscono un sistema per cambiare colore del vetro, in maniera reversibile, senza perdite di visibilità, in modo da ridurre il fattore irraggiamento, mentre gli scaffali di luce

riducono il fenomeno di abbgliamento dovuto alla componente diretta della luce naturale [70].

Ovviamente tali sistemi, pur essendo particolarmente innovativi, esteticamente gradevoli e funzionali sia sotto il profilo energetico, sia del comfort visivo e climatico in generale, necessitano ancora di ulteriori e più approfonditi studi e ricerche prima che possano penetrare il mercato.

Ma se si parla di risparmio energetico, in particolare, non bisogna dimenticare i grandi passi fatti dalla tecnologia nella produzione di lampade e di corpi illuminanti sempre più efficienti e con caratteristiche specifiche a seconda degli utilizzi.

Dalla semplice "lampadina" ad incandescenza che ormai, da settembre 2009, è anche fuori mercato, numerose sono le ulteriori tipologie sviluppate e prodotte, basti pensare ai led o alle fibre ottiche, che con bassi consumi permettono di ottenere elevate prestazioni in termini di flusso luminoso, luminanza ed illuminamenti.



Figura 10 - Tipi di lampade

I parametri caratteristici delle lampade sono:

- *Tensione di alimentazione*: indica la tensione, in Volt, di alimentazione elettrica.
- *Potenza elettrica*: rappresenta, in Watt, la potenza necessaria al funzionamento della lampada.
- *Flusso luminoso*: rappresenta la quantità di luce emessa dalla lampada ed è espressa in lumen.
- *Efficienza luminosa η* : è espressa dal rapporto tra il flusso luminoso emesso dalla lampada e la potenza elettrica necessaria al funzionamento della stessa [lm/W]:

Tabella 1 Efficienza luminosa in funzione del tipo di lampada

Categoria	Tipo	Efficienza luminosa (lm/W)	-
Combustione	candela	0.3	0.04%
Incandescente	5 W tungsteno, incandescente	5	0.7%
	40 W tungsteno, incandescente	12.6	1.9%
	100 W tungsteno, incandescente	17.5	2.6%
	alogeno, bulbo di vetro	16	2.3%
	alogeno, bulbo di quarzo	24	3.5%
Fluorescente	5–24 W fluorescente compatta	45–60	6.6%–8.8%
	34 W tubo fluorescente (T12)	50	7%
	32 W tubo fluorescente (T8)	60	9%
	36 W tubo fluorescente (T8)	fino a 93	fino al 14%
	28 W tubo fluorescente (T5)	104	15.2%
LED	LED bianco	26–70	3.8%–10.2%
	LED bianco (prototipi)	fino a 150	fino al 22%
Lampade a scarica	Lampada allo xeno	30–50	4.4%–7.3%
	Lampade a mercurio-xeno	50–55	7.3%–8.0%
	Lampada a vapori di sodio a.p.	150	22%
	Lampada a vapori di sodio b.p.	183 fino a 200	27%
	1400 W Lampada allo zolfo	100	15%
luce monocromatica 555 nm		683,002	100%

- *Tonalità di luce*, che definisce il “colore” della luce.
- *Indice di resa cromatica*, che esprime la capacità di una lampada di rendere i colori (max = 100).
- *Forma e dimensione*.
- *Tipo di attacco*.
- *Durata*.
- *Condizioni operative*.

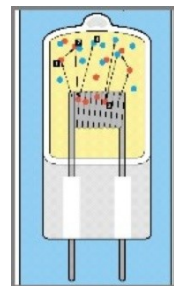
- *Protezione contro i radio-disturbi.*
- *Tempi di accensione e riaccensione dopo lo spegnimento.*

ed essi cambiano al variare delle tipologie di lampade:

Per le **lampade ad incandescenza** l'elemento incandescente è un sottilissimo filamento, nella maggior parte dei casi metallico, solitamente tungsteno, contenuto in un'ampolla (bulbo), attraversato da corrente elettrica, continua o alternata, che ne provoca, per effetto Joule, il surriscaldamento fino a circa 2.800 K e la conseguente emissione di radiazioni visibili. Efficienza luminosa 10 – 25 lm/W; Temperatura di colore: 2.800–3.000 K; Ra = 100; Vita media 1000 h.



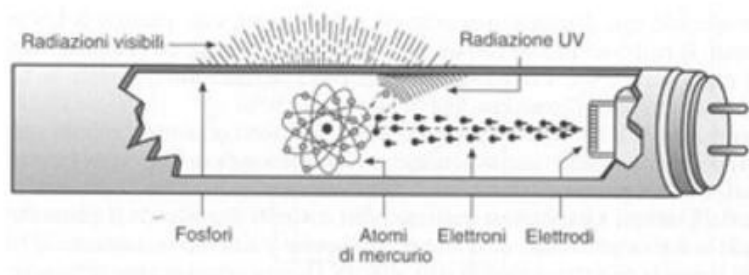
Le **lampade ad incandescenza alogene** sono costituite da un sottile tubo di quarzo a riempimento di iodio, o di altri alogeni, contenente un filamento di tungsteno a spirale rettilinea. Il tungsteno, sublimato dal filamento, reagisce con l'alogeno dando luogo ad un particolare ciclo che evita l'annerimento del tubo. Efficienza luminosa 16–30 lm/W. Temperatura di colore: 2.900 – 3.500 K; Ra = 100; Vita media 2.000 h.



Per le **lampade a scarica** la radiazione luminosa è provocata dagli urti reciproci di particelle, cariche elettricamente, di un gas o di un vapore. Hanno una durata assai maggiore delle lampade ad incandescenza.

Esistono i seguenti tipi di lampade a scarica:

- lampade fluorescenti;
- lampade a vapori di mercurio;
- lampade a vapori di alogenuri;
- lampade a luce miscelata;



- lampade a vapori di sodio;
- lampade allo xeno;
- sistemi ad induzione.

Per le **lampade fluorescenti** l'emissione del vapore di mercurio a bassa pressione è costituita prevalentemente da radiazioni UV: i fosfori convertono le UV in radiazioni visibili. Caratterizzate da bassa luminanza (evitano l'abbagliamento). Flusso luminoso dipendente dalla temperatura ambiente. Situazione ottimale tra 20 e 25 °C. Efficienza luminosa 45-100 lm/W. Temperatura di colore: dipende dai fosfori Ra = 60-95; Vita media 5.000-10.000 h.

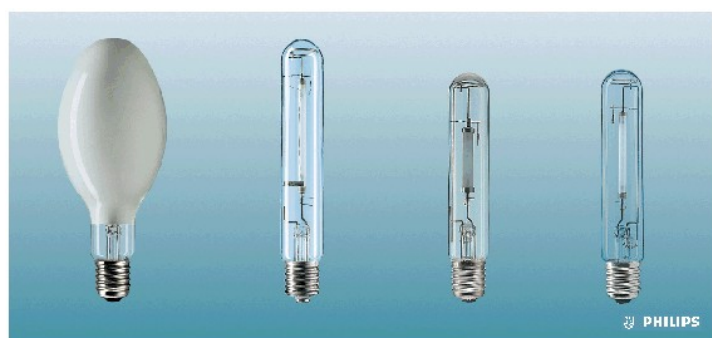


Le **lampade ai vapori di alogenuri** sono costruttivamente simili a quelle al mercurio ma si distinguono da queste soprattutto per la composizione chimica delle sostanze gassose che riempiono il tubo di scarica.



I composti utilizzati, denominati alogenuri (o ioduri perché generalmente si sceglie lo iodio tra gli alogeni), sono formati da elementi non metalli (fluoro, cromo, bromo, iodio) detti alogeni, e da elementi metalli (sodio, tallio, indio).

Le **lampade a vapori di mercurio ad alta pressione** sono costituite da un tubo di quarzo contenente vapore di mercurio (Hg) ad alta pressione, nel quale il passaggio di corrente stabilisce un arco tra due elettrodi, che determina l'emissione



di energia luminosa. I principali pregi delle lampade a mercurio sono la forte efficienza e la lunga durata; perciò esse sono impiegate per economicità di esercizio quando la

resa del colore non ha importanza primaria. Vasta gamma di potenze: da 50 a 2.000 W; Flusso luminoso da 2.000 a 125.000 lm.

Due grandi campi principali di applicazione:

- illuminazione industriale;
- illuminazione stradale.

Le **lampade a vapori di sodio a bassa pressione** emettono luce monocromatica gialla alla lunghezza d'onda caratteristica di emissione del sodio (589 nm). L'efficienza luminosa è molto elevata, ma la pessima resa cromatica ne limita l'impiego. Nella lampade a vapori di sodio ad alta pressione lo spettro di emissione comprende più frequenze e la resa cromatica è migliore anche se non ottima. Impiego consigliabile dove occorre un alto grado di visibilità purché non sia necessaria la distinzione dei colori:



- illuminazione stradale;
- illuminazione di interni ed esterni industriali.

Le **lampade a luce miscelata** sono basate sulla tecnologia delle lampade a vapori di mercurio, a cui viene aggiunto un filamento ad incandescenza in serie al tubo di scarica. Presentano una luce con una componente a spettro continuo tipica del filamento ad incandescenza. Vantaggio nella facilità d'uso: non è necessario alcun tipo di ausiliario elettrico (sostituito dal filamento interno alla lampada), per cui risulta possibile connettere la lampada su un comune attacco Edison.

Efficienza e durata di vita fortemente condizionate dalla presenza del filamento che inoltre le rende abbastanza sensibili alle variazioni della tensione. Conveniente l'applicazione in contesti dove la facilità d'uso è più importante degli aspetti economici. Forte quantità di luce e temperatura di colore più elevata rispetto alle lampade a filamento hanno creato una notevole diffusione di queste lampade per l'illuminazione residenziale (giardini, garage, ecc.).

Le **lampade allo Xeno** sono caratterizzate da una distribuzione dell'energia nello spettro praticamente identica a quella della luce diurna e non influenzata dalle

oscillazioni della tensione di rete. Resa dei colori eccellente e corrispondente a quella della luce naturale. Si accendono istantaneamente e raggiungono immediatamente la piena emissione luminosa. Richiedono, per il loro funzionamento, un alimentatore e un accenditore.

I **sistemi ad induzione** associano i principi della scarica in gas e dell'induzione elettromagnetica. La ionizzazione degli atomi di mercurio realizzata grazie ad un campo elettromagnetico indotto da una corrente elettrica ad alta frequenza che circola in un'apposita bobina.



Sono costituite dai seguenti componenti:

- bulbo entro cui avviene la scarica in gas;
- bobina-antenna;
- generatore elettronico;
- cavo coassiale di collegamento all'antenna.

Grazie all'assenza di filamenti ed elettrodi, sono caratterizzate da una durata eccezionale (circa 60.000 ore di funzionamento pressoché prive di manutenzione). Particolarmente adatte per i luoghi in cui è difficile accedere agli apparecchi di illuminazione e dove la sostituzione delle lampadine costituisce un'operazione costosa e pericolosa.

I **LED** sono costituiti da diodi a giunzione p-n, formati da un sottile strato di semiconduttore drogato. Se sottoposti ad una tensione, rilasciano energia sotto forma di fotoni. Sono tipicamente formati da composti di gallio o silicio: arseniuro di gallio, fosfuro di gallio, fosfuro arseniuro di gallio, carburo di silicio, nitrato di gallio ed indio. In base alla loro composizione emettono luce di una particolare lunghezza d'onda. I primi led emettevano luce rossa, successivamente gialla e verde.



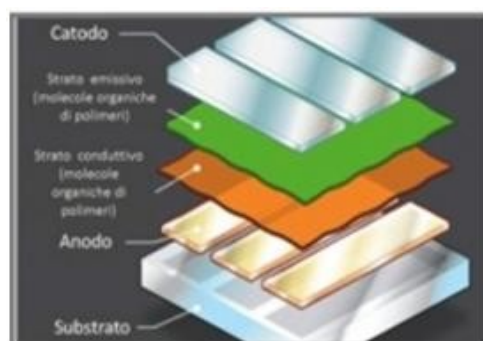
Da quando furono realizzati led blu (anni'90) è possibile ottenere tutte le combinazioni cromatiche. Pregi:

- Elevata affidabilità.
- Lunga durata.
- Elevata efficienza.
- Basso consumo.

Applicazioni: segnaletica, retroilluminazione di display, cartelloni, illuminazione.

Per quanto riguarda l'illuminazione costituiscono sicuramente una promessa per il futuro, ma sono ancora in fase di evoluzione.

Un display **OLED** è composto da vari strati sovrapposti. I costi sono ancora elevati e la durata è limitata. A causa della natura monopolare degli strati di materiale organico, i display OLED conducono corrente solo in una direzione, comportandosi in modo analogo a un diodo: di qui il nome di O-LED. Le applicazioni nel settore dell'illuminazione sono promettenti, ma non ancora competitive. Gli strati sono flessibili e la tensione di alimentazione è bassa.



Il flusso luminoso emesso dalle lampade deve essere opportunamente distribuito nello spazio in modo da soddisfare le diverse esigenze ed evitare i fenomeni di abbagliamento. A tal fine si adoperano dei sistemi costituiti da elementi riflettenti e/o rifrangenti e/o diffondenti che formano un sistema ottico. L'insieme della lampada e di tale sistema è detto apparecchio illuminante. Altre funzioni dell'**apparecchio illuminante** sono: protezione meccanica, elettrica e termica della lampada. Vengono suddivisi in cinque gruppi per tipi di illuminazione diretta, semi-diretta, mista, semi-indiretta, indiretta.

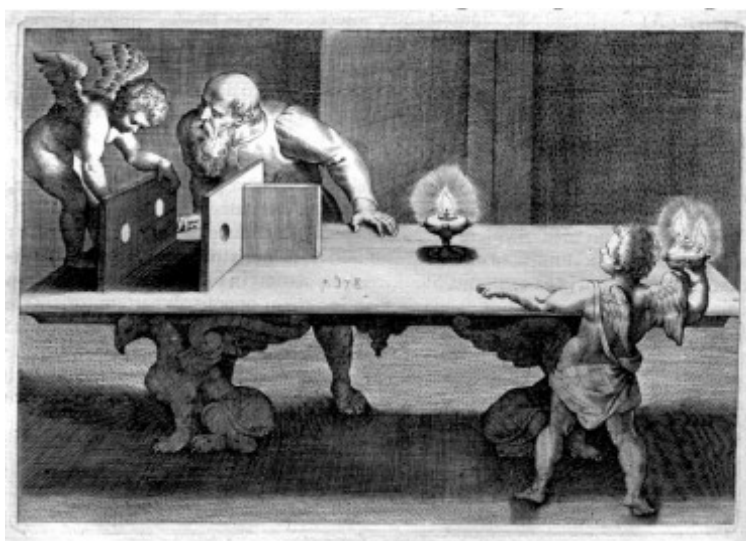
- I **riflettori** consentono di proiettare al di fuori dell'apparecchio due fasci di luce sovrapposti, uno diretto ed uno riflesso.

- I **rifrattori** si impiegano quando il solo riflettore non è sufficiente per controllare il flusso. Consistono generalmente in coppe o pannelli lisci da una parte e dotati di prismi conici o piramidali sull'altra.
- I **diffusori** aumentano la dimensione apparente della sorgente in modo da ridurre la luminanza della lampada. Sono costruiti con vetro opale o plastiche opportunamente trattate.
- Gli **schermi** possono essere interni oppure esterni all'apparecchio d'illuminazione (deflettori, lamelle, nidi d'ape, alette o altro).
- I **filtri** possono essere in vetro oppure in plastica, colorati oppure anti-UV/IR.
- Le **lenti** servono a concentrare, diffondere o sagomare l'impronta luminosa e conseguentemente modificare il solido fotometrico uscente dall'apparecchio.

2. ANALISI TEORICA E SPERIMENTALE DELLE CARATTERISTICHE DELLA LUCE NATURALE

Introduzione (Integrazione Luce Naturale/ Artificiale)

Ormai sono anni che studiosi, ricercatori, progettisti e cultori della luce studiano, analizzano ed elaborano metodi, tecniche e teorie riguardo la luce naturale e la sua integrazione ottimale con quella artificiale, per il comfort visivo ed il risparmio energetico.



Già nel 1895 [71] veniva introdotto il **Daylight Factor** per valutare le performance dell'illuminazione naturale, indipendentemente dalla luminanza istantanea del cielo.

Allo stesso modo, Luckiesh e Guth nel 1949 e Petherbridge ed Hopkinson nel 1950, gettavano le basi dello studio dell'abbagliamento molesto, esaminando le caratteristiche di piccole sorgenti luminose, in contrasto con l'ambiente circostante e sviluppando i primi algoritmi per descrivere le relazioni analitiche per sorgenti con dimensione apparente maggiore dei 0,01 steradiani [72, 73, 74].

Fisher e van Ierald negli anni settanta studiavano tecniche di riduzione dell'abbagliamento debilitante dovuto a fenomeni di effetto velo o di eccessiva luminanza diretta agli occhi dell'osservatore [75].

Se la valutazione del comfort e delle prestazioni visive all'interno di ambienti illuminati da sistemi di luce artificiale, mediante valutazione dei rapporti di luminanza nel campo

di vista, dell'uniformità degli illuminamenti e dell'UGR, è tuttora oggetto di ricerca e di discussione, per l'illuminazione naturale, si vanno ad aggiungere le problematiche connesse alla variabilità nel tempo delle condizioni di luce ed alla differente risposta del sistema visivo, in termini di tollerabilità, rispetto alla presenza di sorgenti artificiali. Inoltre, l'ampiezza della sorgente e l'elevato campo di variazione dei valori di luminanza complicano ulteriormente il problema.

Nel 1986, Claude Robbins, direttore del Solar Energy Research Institute, si chiedeva perché l'illuminazione naturale non fosse ancora particolarmente utilizzata negli edifici, pur essendoci numerosi motivi favorevoli al suo utilizzo e pur essendo un elemento fondamentale della progettazione [52].

Egli individuava cinque argomenti tecnici principali, ancora da descrivere, approfondire ed accettare, prima che l'illuminazione naturale potesse essere utilizzata a pieno come tecnologia integrata della progettazione degli ambienti costruiti:

1. La necessità di una raccolta dati della disponibilità di luce naturale per analizzare le performance illuminotecniche ed energetiche del sistema edificio-impianto.
2. La necessità di un metodo sistematico di descrizione dei concetti di illuminazione naturale.
3. La necessità di metodi completi di analisi che includano tutti gli aspetti della performance del sistema di illuminazione (illuminazione, energia, e comfort visivo).
4. La necessità di un metodo di integrazione di illuminazione naturale ed artificiale.
5. La necessità di individuare chi ha la responsabilità di progettare il sistema di illuminazione naturale (l'architetto, l'ingegnere, il lighting designer o una figura che sia la combinazione di queste).

Il terzo punto è oggetto del presente capitolo. Esso riguarda le proprietà fisiche della luce naturale da correlare alle esperienze ed alle sensazioni umane, in termini di umore, di produttività e di soddisfazione.

2.1. Indicatori prestazionali della luce naturale negli ambienti confinati

L'illuminazione naturale è un aspetto della performance di un edificio notoriamente difficile da valutare [76]. Una delle difficoltà nel definire una illuminazione naturale ottimale sta proprio nel fatto che ciascuna figura professionale che se ne occupa (il lighting designer, l'ingegnere, l'architetto, ...) si concentra su aspetti differenti della luce stessa (Tabella 1).

Tabella 2 - Cinque esempi di definizioni dell'illuminazione da luce naturale [52]

Architectural definition: the interplay of natural light and building form to provide a visually stimulating, healthful, and productive interior environment
Lighting Energy Savings definition: the replacement of indoor electric illumination needs by daylight, resulting in reduced annual energy consumption for lighting
Building Energy Consumption definition: the use of fenestration systems and responsive electric lighting controls to reduce overall building energy requirements (heating, cooling, lighting)
Load Management definition: dynamic control of fenestration and lighting to manage and control building peak electric demand and load shape
Cost definition: the use of daylighting strategies to minimize operating costs and maximize output, sales, or productivity

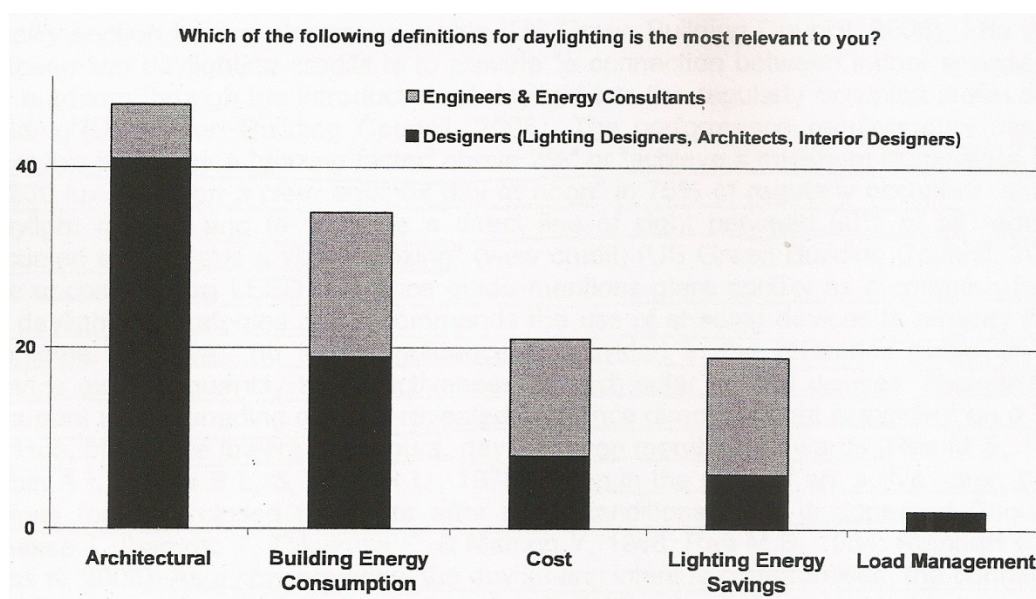


Figura 11 – Risultati di una intervista sulla funzione dell'illuminazione da luce naturale nella progettazione sostenibile [52]

Lo studio dell'illuminazione naturale è importante per ogni tipo di spazio, dal commerciale all'istituzionale, con finestre o lucernai. Tali spazi sono soggetti agli effetti negativi dell'illuminazione naturale, pur sfruttando i suoi vantaggi.

I criteri di valutazione dell'illuminazione includono:

- L'intensità (definisce gli illuminamenti orizzontali o verticali o la luminanza della superficie);
- L'uniformità o l'enfasi (includono il contrasto, il rapporto di uniformità, gli indici di abbagliamento e l'andamento della luminanza);
- La direzionalità della luce.

Tali criteri caratterizzano le proprietà fisiche dell'illuminazione che vanno correlate all'esperienza umana in termini di umore, di produttività e di soddisfazione ed all'efficienza energetica dell'edificio.

La variazione temporale dell'illuminazione naturale può essere un ulteriore stimolo, ma comporta un'altrettanta complessità nella definizione degli indici prestazionali della luce naturale negli ambienti confinati.

Dal punto di vista energetico, i principali indici di performance, come il Daylight Factor (DF), lo Useful Daylight Illuminance (UDI), la Daylight Autonomy (DA), il Vertical-Horizontal illuminance ratio (VH RATIO), il Lighting Energy Numeric Indicator (LENI), valutano, a seconda dei casi, illuminamenti, disponibilità di luce e consumi per l'illuminazione artificiale, presentando chi più chi meno vantaggi e svantaggi per l'affidabilità e l'applicabilità.

Allo stesso modo, il comfort visivo che è strettamente connesso all'abbagliamento molesto o psicologico e ad esso sono dovute le maggiori critiche nei confronti degli ambienti confinati, risulta difficile da valutare e gli strumenti che oggi abbiamo a disposizione (GLARE INDEX, DGI – DAYLIGHT GLARE INDEX, DGI_N , PGSV, J-INDEX, Stationary Virtual Reality, Visual Comfort Evaluation Method, User Acceptance Studies, Degree of Discomfort Glare) risultano poco pratici e scarsamente affidabili.

Addirittura, in molti casi, la sensazione di fastidio, pur non compromettendo la capacità visiva, determina condizioni di disagio, che alla lunga possono comportare una riduzione delle prestazioni lavorative, una maggiore irritabilità o disturbi come mal di testa o sensazioni di vertigine. In presenza di abbagliamento debilitante, invece, gli occupanti, di solito, notano una riduzione immediata nella loro capacità visiva e possono reagire spostandosi, o utilizzando una qualsiasi schermatura.

Talvolta, però, i due tipi di abbagliamento coesistono. In tali circostanze risulta complesso separare i due effetti per un determinato punto di osservazione, dato che i metodi attuali di valutazione dell'abbagliamento utilizzano relazioni differenti per ciascun tipo.

Nel caso di compiti visivi relativi all'utilizzo del computer, l'inconveniente può essere rappresentato sia dalla riflessione di velo, sia dall'elevata luminanza dello sfondo rispetto a quella proveniente dallo schermo [77].

Infatti, l'abbagliamento molesto è causato da una elevata e/o non uniforme luminanza all'interno del campo di vista o da eccessivi contrasti di luminanza della sorgente abbagliante (finestra), sia con le pareti adiacenti, sia con il soffitto e il pavimento. Numerosi studi, inoltre, hanno dimostrato che esso dipende dalla posizione della sorgente abbagliante, dalle sue dimensioni [78] e dalla porzione di cielo che attraverso essa viene vista.

La reazione soggettiva all'illuminazione dell'ambiente confinato è complessa. Inoltre, non è possibile misurare direttamente in maniera oggettiva la sensazione di fastidio che viene provata a lungo prima che si possa determinare un qualsiasi effetto, soprattutto in termini di prestazioni lavorative.

La ricerca sull'abbagliamento molesto o psicologico ha fornito come risultati diverse relazioni, attraverso le quali, generalmente, il grado di percezione del discomfort è espresso da un indice.

La maggior parte di tali relazioni sono state sviluppate per la valutazione del discomfort da abbagliamento dovuto a sorgenti artificiali di piccole dimensioni: VCP-Visual Comfort Probability, BGI-Building Research Station Glare Index, UGR-Unified Glare Rating.

Visto che queste relazioni sono state definite per sorgenti artificiali di piccole dimensioni, non possono essere utilizzate per la valutazione del discomfort da abbagliamento prodotto da luce naturale. In secondo luogo, si è verificato che **a parità del grado di abbagliamento molesto, la luminanza del cielo vista attraverso una finestra può essere maggiore della luminanza di una sorgente artificiale confrontabile in dimensioni**. In altre parole, sembra possibile una

maggior tolleranza per le finestre con valori medi del livello di abbagliamento, rispetto alle sorgenti di luce artificiale [79].

DAYLIGHT FACTOR

Il daylight factor o fattore medio di luce diurna (FLD) è il rapporto tra l'illuminamento interno E_i e l'illuminamento disponibile, nello stesso istante, all'esterno E_e , entrambi misurati su superficie orizzontale, con condizione di cielo "overcast". La componente diretta è esclusa sia per la parte esterna sia per quella interna [80, 81]. Il principio consiste nel fatto che, mentre la luminanza del cielo overcast può aumentare o diminuire nel tempo, l'andamento della luminanza nella volta celeste rimane costante come l'andamento risultante degli illuminamenti in uno spazio illuminato da luce naturale. Di norma il DF è determinato per un piano orizzontale posto a 0,85 m dal suolo e la relazione analitica che lo descrive è:

$$DF_o = \frac{E_i}{E_e} \times 100$$

È espresso in percentuale e un DF_o pari al 2% significa che il 2% dell'illuminamento disponibile all'esterno, raggiunge l'ambiente interno in un definito punto. Poiché il DF è espresso come un rapporto tra gli illuminamenti interni ed esterni, esso costituisce una misura relativa e non assoluta dell'illuminamento. Sebbene il daylight factor method è stato tipicamente utilizzato per la progettazione e l'analisi di edifici ampi, esso può essere ugualmente utilizzato per singoli ambienti o per spazi individuati all'interno di stanze [52].

Il metodo più comune di calcolo del DF definisce tre componenti:

- la **componente di cielo** (SC_o) che è l'illuminamento relativo che colpisce un punto fissato ed è costituita da sola luce proveniente direttamente dal cielo;
- la **componente riflessa esterna** (ERC_o) è l'illuminamento relativo che colpisce un punto fissato ed è costituita da sola luce proveniente direttamente dalle superfici riflettenti esterne;

- la **componente riflessa interna** (IRC_o) è l'illuminamento relativo che colpisce un punto fissato ed è costituita da sola luce proveniente direttamente o indirettamente dalle superfici riflettenti interne.

Dato che il DF è valido solo per cielo overcast, la componente diretta del sole è esclusa.

Inoltre, si considera:

- un **fattore di manutenzione interna** (MF) che rappresenta la frequenza di pulizia delle superficie interne e quindi rappresenta i fattori di riflessione delle superfici interne.
- un **fattore di trasmissione e di rifrazione del vetro** (C_g).

In tal modo la relazione che esprime il daylight factor è:

$$DF_o = \{SC_o + ERC_o + [MF \cdot IRC_o]\} \cdot C_g$$

In accordo con Hopkinson, Petherbridge e Longmore, i suoi vantaggi come indicatore prestazionale dell'illuminazione naturale negli ambienti confinati sono:

- Nell'evidenziare l'efficienza di un ambiente e delle sue aperture verso l'esterno, come un sistema complessivo di illuminazione naturale. Infatti esso è la combinazione di fattori geometrici e fotometrici, sia dell'ambiente confinato interessato dalla misura, sia delle superfici e dell'ambiente esterno.
- Nel tener conto degli illuminamenti relativi, piuttosto che quelli assoluti. Esso esprime la quantità di luce in uno spazio, in relazione a quella disponibile all'esterno.

Il daylight factor è stato utilizzato a lungo nella ricerca e nella progettazione degli edifici. Esso è l'unica procedura raccomandata dalla CIE – Commission Internationale de l'Eclairage per determinare le prestazioni relative all'illuminazione naturale negli edifici.

Tuttavia, tale indicatore presenta diversi limiti [82] tra cui:

- Non fornisce informazioni per condizioni reali, dato che considera la sola condizione di cielo overcast. Al contempo, però tale caratteristica può essere considerata a vantaggio di sicurezza, ovvero sottostima la disponibilità degli illuminamenti interni.
- Fornisce una significativa variabilità nel tempo, per i valori delle componenti in gioco misurati.
- Presenta difficoltà nel coordinare le misure esterne e quelle interne.
- Non può essere utilizzato come indicatore dei livelli di illuminamento forniti da una combinazione di luce naturale ed artificiale.
- Non fornisce informazioni riguardo l'abbagliamento da luce naturale.

VH RATIO

Nel 1990, due ricercatori, Love e Navaab hanno introdotto un nuovo indicatore delle prestazioni della luce naturale [83] il **VH RATIO** (the Vertical-Horizontal illuminance ratio).

Definito dagli stessi autori, nettamente superiore al daylight factor, è il rapporto degli illuminamenti su due superfici verticali ed orizzontali, passanti per un singolo punto nello spazio.

Valutazioni comparative del VH ratio e del daylight factor, attraverso misure fotometriche in spazi in scala reale con cinque tipi differenti di finestre, hanno dimostrato che il primo risulta essere più semplice da utilizzare e fornisce molte più informazioni, anche in condizioni di cielo "clear" e "partly cloudy", oltre che overcast.

Inoltre, relativamente alla qualità dell'illuminazione e della percezione umana, il VH ratio si è dimostrato superiore al daylight factor per i seguenti motivi:

- Esso fornisce informazioni utili, anche in presenza di componente diretta della luce solare e con qualsiasi carico di nuvole. Ciò ha importanza per l'abbagliamento. Infatti, il discomfort causato da luce naturale può portare l'utente a ridurre o addirittura eliminare la luce solare, comportando una riduzione dei vantaggi psicologici ed energetici.

- Il VH ratio è funzione della direzionalità della luce, che lo rende un vero e proprio indicatore:
 1. dell'estensione dell'illuminazione;
 2. delle condizioni di abbagliamento;
 3. dei contrasti.
- Il VH ratio è più semplice da utilizzare rispetto al daylight factor, dato che esso cattura molte caratteristiche della luce naturale in una sola e relativamente semplice misura di un luxmetro.
- Attraverso opportune considerazioni riguardo l'abbagliamento, esso può essere applicato alla illuminazione artificiale ed a quella naturale, singolarmente o in combinazione.

UDI - USEFUL DAYLIGHT ILLUMINANCE

Anche gli autori dello UDI – Useful Daylight Illuminance, nel 2004 presentano tale indicatore delle prestazioni della luce naturale, come sostitutivo del daylight factor [84-85].

L'UDI è stato definito al fine di supportare l'interpretazione di analisi dei livelli di illuminamento da illuminazione naturale basata su dati climatici meteorologici orari del periodo di un anno. Diversamente dal daylight factor, esso considera condizioni di sole e di cielo realistiche e variabili nel tempo e predefinisce, su base oraria, i valori assoluti di illuminamento da luce naturale.

A differenza del **Daylight Autonomy**, che misura quanto spesso (in percentuale) in un prefissato periodo, l'illuminamento dovuto alla sola luce naturale supera una soglia di illuminamento predefinita, l'UDI definisce quanto spesso, in un anno, l'illuminamento dovuto alla sola luce naturale si trova all'interno del range 100 – 2.000 lx. Secondo Nabil e Mardaljevic il daylight autonomy non dà significato ai valori al disotto della soglia definita, ma che senz'altro vengono considerati dagli utenti e che hanno il potenziale per sostituire parte o tutta l'illuminazione artificiale. Inoltre, il daylight autonomy non tiene conto di quanto la soglia di illuminamento viene superata

istante per istante, al variare delle condizioni di cielo. Ciò provoca risvolti negativi sul comfort degli utenti.

Al contrario, l'UDI è basato sul range compreso tra 100 e 2.000 lx, in base a considerazioni e studi dei comportamenti degli utenti in condizioni di illuminazione naturale:

- I valori di illuminamento da luce naturale inferiori ai 100 lx sono da considerare insufficienti, sia nel caso di sola luce naturale, sia come contributo all'illuminazione artificiale;
- I valori di illuminamento da luce naturale compresi tra i 100 lx e i 500 lx sono da considerare efficaci, sia nel caso di sola luce naturale, sia come integrazione con la luce artificiale;
- I valori di illuminamento da luce naturale compresi tra i 500 lx e i 2.000 lx sono da considerare desiderabili o appena tollerabili;
- I valori di illuminamento superiori ai 2.000 lx possono provocare discomfort visivo o termico.

I valori dell'illuminamento da luce naturale variano nel piano di lavoro, sia nello spazio, sia nel tempo. Ad esempio, all'aumentare della distanza dalla finestra, essi diminuiscono rapidamente, oppure, in un punto fisso, essi variano nel tempo, al variare delle condizioni di cielo.

Quindi, la scelta di individuare l'illuminamento utile all'interno di un range risiede in due considerazioni principali:

- Se i valori scendono al di sotto della soglia minima, il contributo della luce naturale alla integrazione con la luce artificiale diventa nullo.
- Se i valori dell'illuminamento superano la soglia del massimo del range, aumenta la probabilità che si verifichino problemi di comfort visivo e/o termico.

Gli illuminamenti che rientrano nel range sono quelli utili a svolgere tutte le attività nell'edificio oggetto di studio.

LENI – Lighting Energy Numeric Indicator

In seguito all’emanazione della direttiva europea per il contenimento dei consumi energetici degli edifici (Official Journal of The European Communities, 2003), tra le varie norme redatte dal CEN e orientate alla valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, al fine di una classificazione energetica, vi è la EN 15193 del 2007 che ha introdotto il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator), un parametro di efficienza energetica che ***rappresenta il consumo energetico annuo per metro quadrato dovuto all’illuminazione e comprendente anche le aliquote dovute al funzionamento delle apparecchiature di controllo***, per l’illuminazione di emergenza e l’esercizio in standby.

Il LENI dipende ***dalle potenze installate e dal tempo di funzionamento delle varie apparecchiature durante il periodo di osservazione***, che può essere mensile o annuale in base alla procedura di calcolo adottata, ***ma tiene conto anche di vari altri fattori riduttivi quali la presenza di luce naturale, l’adozione di sistemi di controllo e di gestione, nonché la manutenzione***.

Secondo la procedura indicata in normativa è possibile ridurre i consumi, non soltanto attraverso il contributo della luce naturale, ma anche tenendo conto di due aspetti distinti connessi all’utilizzo di sistemi di controllo automatico.

Il primo riguarda l’effettiva presenza di individui all’interno del locale, a prescindere dalla pianificazione oraria programmata, di cui si tiene conto mediante il fattore di occupazione, dipendente a sua volta dal fattore di assenza relativo alla destinazione d’uso del locale e dal fattore legato al tipo di controllo di presenza. Quest’ultimo varia dal sistema meno efficiente con interruttore manuale on/ off, al sistema più efficiente, manuale on/ auto off.

Il secondo aspetto si riferisce, invece, alla presenza di un sistema di controllo ad illuminamento costante che influisce sul fattore di manutenzione. In presenza di un sistema di controllo ad illuminamento costante è possibile limitare il flusso luminoso a quello strettamente necessario al mantenimento degli illuminamenti richiesti, ottenendo un ulteriore risparmio energetico.

Strettamente connesso all'aspetto dell'integrazione luce naturale e luce artificiale e comportamento degli utenti è anche un altro indicatore, il **DUF – Daylight Utilization Fraction**. Definito da Robbins nel 1984 [86], esso è utilizzato per analizzare le caratteristiche illuminotecniche di performance delle opzioni di controllo e per determinare l'energia giornaliera potenzialmente conservabile per l'illuminazione e per il raffrescamento.

Esso, in generale, analizza i dati su base giornaliera, ma è possibile ricavare dati mensili o annuali, con la somma dei DUF giornalieri.

Per determinare il DUF bisogna definire la porzione di ogni giorno lavorativo durante il quale l'illuminazione naturale può sostituire quella artificiale in ciascuna area di controllo.

L'analisi del DUF per ciascuna area di controllo è eseguita sia per condizioni di cielo "clear" sia per quelle "overcast", in modo che sulla base di dati statistici che permettono di prevedere la porzione di ciascuna ora per la quale si avrà l'una o l'altra condizione di cielo, permette un DUF pesato, ottimizzando il sistema di controllo e di regolazione della luce artificiale.

GLARE INDEX

L'abbagliamento da un'ampia sorgente di luce, come una finestra, è stato studiato fin dagli anni '80 al Building Research Establishment in UK [87] e fin dagli anni '60 alla Cornell University negli USA [88]. Il lavoro complessivo ha fornito una relazione analitica sull'abbagliamento, detta *Cornell Formula*, basata sul rapporto tra la sorgente e la luminanza dell'ambiente circostante. Il grado di abbagliamento può essere espresso da:

$$G = K \left[\frac{L_s^{1.6} \Omega^{0.8}}{L_b + (0.07 \omega^{0.5} L_s)} \right]$$

dove:

K è una costante il cui valore dipende dalle unità di misura e dalla sorgente;

L_s ed L_b sono rispettivamente le luminanze della sorgente e dell'ambiente circostante.

Ω e ω sono gli angoli solidi della sorgente, rispettivamente rispetto all'asse di vista (secondo l'indice di posizione di Guth) e rispetto all'occhio dell'osservatore.

Tale relazione può essere applicata a ciascuna sorgente e la sommatoria finale secondo la relazione:

$$GI = 10 \log_{10} \sum G$$

fornisce il **Glare Index**.

Ma tale indice non è utilizzato negli USA, né per l'abbagliamento da luce naturale, né per quello da luce artificiale. Esso è riconosciuto dalla CIE, ma è utilizzato solo in alcuni paesi europei come un mezzo per descrivere il potenziale abbagliante di alcune sorgenti.

Negli USA sono utilizzati metodi basati sulla probabilità del comfort visivo (VCP – Visual Comfort Probability) comprovati dalla IES/US generalmente applicati all'illuminazione artificiale.

DGI – DAYLIGHT GLARE INDEX

Il DGI (Daylight Glare Index) è forse l'indice più noto e diffuso per la valutazione dell'abbagliamento molesto da luce naturale.

La prima espressione del *DGI (Daylight Glare Index)* è basata proprio sulla **Cornell Formula** che è stata sviluppata per determinare il discomfort da abbagliamento da ampie sorgenti di luce artificiale o naturale. Tale relazione è una versione del BGI (Building Research Station Glare Index), modificata sulla base dei risultati ottenuti da esperimenti eseguiti per ampie sorgenti di luce artificiale.

Il grado di percezione del discomfort da abbagliamento è rappresentato da un Indice di Abbagliamento il GI-Glare Index, descritto dalla seguente relazione:

$$GI = 10 \cdot \log_{10} 0,478 \cdot \left(\frac{L_s^{1,6} \cdot \Omega^{0,8}}{L_b + (0,07 \omega^{0,5} \cdot L_s)} \right)$$

dove:

L_s è la luminanza della sorgente abbagliante [cd/m^2];

L_b è la luminanza media dell'ambiente circostante a cui è sottratta la luminanza della sorgente abbagliante [cd/m^2];

ω è l'angolo solido rispetto all'occhio dell'osservatore [sr];

Ω è l'angolo solido modificato in funzione dell'asse di vista dell'osservatore, al variare dell'Indice di Posizione "P" [sr] (Guth 1963):

$$\Omega = \int_{\omega_s} \frac{d\omega_s}{P^2}$$

Tabella 3 - Indice di abbagliamento GI

Grado di percezione dell'abbagliamento	GI
Appena percepibile	10
Appena accettabile	16
Limite tra comfort e discomfort	18,5
Appena non confortevole	22
<i>Appena intollerabile</i>	28

L'applicabilità della formula di Cornell alle sorgenti di luce naturale è stata verificata in diversi studi ed in diverse condizioni di illuminazione naturale per le quali si sono definiti valori del discomfort da abbagliamento, sia in termini di grado di discomfort sia di accettabilità di questo grado, per le specifiche caratteristiche della stanza.

Le valutazioni soggettive sono state confrontate con i valori calcolati del grado di discomfort da abbagliamento, in accordo con il DGI, che è una versione più semplice della relazione di Cornell, modificata da Chauvel:

$$\text{DGI} = 10 \log \sum_{i=1}^n G_i$$

con:

$$G_i = 0,478 \cdot \left(\frac{L_s^{1,6} \cdot \Omega_i^{0,8}}{L_b + (0,07 \omega^{0,5} \cdot L_w)} \right) \quad (1)$$

dove:

L_s luminanza di ciascuna parte della sorgente (cielo, ostruzioni e terreno) [cd/m^2];

L_b luminanza media delle superfici interne dell'ambiente, che rientrano nel campo di vista dell'osservatore [cd/m^2];

L_w luminanza media della intera finestra, ponderata rispetto alle aree relative di cielo, ostruzioni e terreno [cd/m^2];

ω angolo solido totale rispetto all'occhio dell'osservatore [sr];

Ω angolo solido, corretto in relazione all'asse di vista dell'osservatore [sr].

Si sono eseguiti diversi esperimenti in cui gli osservatori esprimevano il loro accordo con gli indici di abbagliamento per alcuni compiti visivi, verificando i risultati con la Cornell Formula. Con questa ricerca non solo si è dimostrato una maggiore tolleranza dell'abbagliamento da luce naturale rispetto a quella artificiale, ma è stata anche modificata la scala del GI e si è definita una relazione numerica tra gli indici di abbagliamento per i corrispondenti gradi di discomfort da abbagliamento, sia da luce naturale, sia artificiale:

$$DGI = \frac{2}{3} \cdot (GI + 14)$$

Tabella 4 - Confronto degli indici di abbagliamento GI e DGI

Grado di percezione dell'abbagliamento	GI	DGI
Appena percettibile	10	16
	13	18
Appena accettabile	16	20
Limite tra comfort e discomfort	18,5	22
Appena non confortevole	22	24
	25	26
<i>Appena intollerabile</i>	28	28

La valutazione del DGI risulta non molto semplice ed immediata, sia per la determinazione dei parametri geometrici che compaiono nella relazione che lo definisce, in particolare angolo solido e indice di posizione, sia per la determinazione dei valori di luminanza percepiti dall'osservatore, che peraltro va eseguita nel minor tempo possibile, data la variabilità della sorgente naturale. Inoltre, la sorgente può

essere suddivisa in elementi considerati a luminanza uniforme, ma si è verificato che il tipo di suddivisione influisce in maniera significativa sul risultato finale [89].

La sua applicabilità, in particolare a sorgenti con livelli di luminanza disomogenei, però, presenta alcuni limiti ed alcune difficoltà che la ricerca ha tentato di superare, proponendo altri indici come il PGSV (Predicted Glare Sansation Value), o il J-Index, quest'ultimo applicabile in ambienti in cui sono presenti videotermini.

ALTRI INDICI DI ABBAGLIAMENTO

Oltre al DGI si sono approfonditi altri studi riguardanti indici del discomfort da abbagliamento da luce naturale, in particolare: il **DGI_N**, il **PGSV**, il **J-INDEX**, ed anche metodi empirici per una valutazione soggettiva del discomfort da abbagliamento: lo **Stationary Virtual Reality**, il **Visual Comfort Evaluation Method**, gli **User Acceptance Studies** ed il **Degree of Discomfort Glare**.

È da considerare, però, che:

- delle poche relazioni attualmente conosciute per una valutazione del discomfort da abbagliamento, nessuna è internazionalmente accettata come relazione matematica descrittiva del fenomeno dell'abbagliamento da luce naturale;
- non è possibile misurare direttamente il grado di abbagliamento molesto, dato che questo viene percepito a lungo prima che possa essere determinato un qualsiasi cambiamento nelle prestazioni dell'utente;
- anche l'applicazione delle CCD camera per la valutazione dell'abbagliamento, può comportare difficoltà connesse alla taratura geometrica dello strumento;
- la valutazione del discomfort da abbagliamento da luce naturale in test-room, con finestre simulate, può indurre in complessi problemi di valutazione, data la maggiore tolleranza dell'uomo alle finestre rispetto alle sorgenti di luce artificiale, a parità di valori di luminanza;
- le relazioni per la valutazione del discomfort da abbagliamento da luce naturale, attualmente presenti in letteratura, sono basate su esperimenti con sorgenti di luce uniforme e, per questo, non possono essere applicate al caso dell'abbagliamento provocato da finestre. Nella maggior parte dei casi si tratta di superfici complesse con elevati gradienti di luminanza.

Il **DGI_N** è stato introdotto da Nazzal [90], al fine di sviluppare un nuovo metodo matematico che potesse valutare l'abbagliamento, anche nel caso di luce solare diretta e che potesse essere implementato in un programma di calcolo, sulla base dei valori di luminanza forniti dal software Radiance.

Tale indice presenta le seguenti differenze rispetto alla relazione di Chauvel:

- l'angolo solido apparente della sorgente rispetto all'osservatore è sostituito da " ω_N " e l'angolo solido corretto da " Ω_N ", i quali tengono conto anche dell'effetto della posizione dell'osservatore e del fattore di configurazione Φ ;
- la luminanza di background " L_b " è sostituita dalla Luminanza di adattamento " $L_{adaptation}$ " a causa della maggiore influenza che ha la luminanza dell'ambiente immediatamente circostante sul discomfort da abbagliamento.

I parametri che entrano in gioco secondo Nazzal sono:

- La luminanza della finestra, ovvero la luminanza media del piano della finestra:

$$L_{window} = \frac{E_{v3shielded}}{(2\Phi_i\pi)}$$

- La luminanza di adattamento, la luminanza dell'ambiente circostante, incluse le riflessioni delle superfici interne:

$$L_{adaptation} = \frac{E_{v2unshielded}}{\pi}$$

- La luminanza esterna, ovvero la luminanza causata dalla luce diretta, dalla luce diffusa dal cielo e dall'aliquota riflessa dal terreno e dalle altre superfici esterne:

$$L_{exterior} = \frac{E_{v1unshielded}}{[2(\pi - 1)]}$$

Essi sono correlati secondo la seguente espressione:

$$DGI_N = 8\log_{10} \left\{ 0,25 \left[\frac{\Sigma(L_{exterior}^2 \cdot \Omega_{PN})}{L_{adaptation} + 0,07 \cdot (\Sigma L_{window} \cdot \omega_N)^{0,5}} \right] \right\}$$

Il **PGSV (Predicted Glare Sensation Vote)** è rappresentato da una relazione ottenuta da esperimenti con finestre simulate [91, 92, 93, 94]. Più di 200 differenti

soggetti hanno partecipato a questi esperimenti in 120 differenti condizioni di test. Il grado percepito di discomfort da abbagliamento è stato rappresentato dal GSV (Glare Sensation Vote), definito dai soggetti su una scala multi criterio:

$$GSV = \frac{(DGI - 16)}{4}$$

Il Glare Sensation Vote ed il Daylight Glare Index hanno mostrato buone correlazioni, tanto che, alcuni ricercatori come Iwata e i suoi colleghi hanno contribuito alla definizione di un Predicted Glare Sensation Vote (PGSV), che è espresso dalla seguente relazione:

$$PGSV = 3,2 \cdot \log_{10} L_{wp} - 0,64 \cdot \log_{10} \omega + (0,79 \cdot \log_{10} \omega - 0,61) \cdot \log_{10} L_b - 8,2$$

dove:

$$L_b = \left(\frac{\frac{E_v}{\pi} - L_{wp} \cdot \Phi_w}{1 - \Phi_w} \right)$$

dove:

E_v è l'illuminamento verticale agli occhi [lux];

L_{wp} è la luminanza visibile all'interno del piano della finestra [cd/m^2];

ω è l'angolo solido sotteso alla sorgente [sr];

Φ_w è il fattore di configurazione della finestra.

Il PGSV presenta i seguenti limiti [95]:

- Se la dimensione della sorgente aumenta fino a coincidere con l'intero campo di vista, il valore del PGSV diventa indipendente dall'ambiente circostante.
- Se la sorgente è una finestra, gli effetti della forma della sorgente non influiscono sulla sensazione di abbagliamento.

Il **J-INDEX** [96, 97] è uno strumento per stabilire condizioni ottimali di comfort di vista. Gli autori affermano che "lo sforzo visivo è associato ad una perdita di performance, dovuta a condizioni di illuminazione non ottimali". Queste condizioni sono il risultato di un'insufficiente o eccessiva luminanza, o probabilmente contrasti non adatti.

Il J-INDEX definisce l'effetto di questi tre aspetti, considerando il comfort come una performance ed esprime la differenza tra l'acuità visiva massima possibile " A_{\max} " e l'acuità visiva che la stessa persona può raggiungere " A " in una data condizione di illuminazione:

$$J = \frac{(A_{\max} - A)}{A_{\max}}$$

dove:

A_{\max} è l'acuità visiva massima possibile di un individuo;

A è l'acuità visiva in una determinata situazione;

$$A = A_{\max} \cdot r_1(C_1) \cdot r_2(C_2) \cdot r_3(E_p)$$

con r_1 , r_2 ed r_3 le relative influenze sull'acuità di C_1 , C_2 ed E_p .

Per quanto riguarda i metodi di valutazione soggettiva del discomfort da abbagliamento, essi fanno riferimento a modelli in scala per i quali, le valutazioni soggettive vengono confrontate con le valutazioni ottenute in ambienti a grandezza naturale.

Lo **Stationary Virtual Reality (SVR)** [98, 99, 100] è basato sull'uso di simulazioni al computer, al fine di offrire condizioni di test equivalenti ad un numero di soggetti.

La messa a punto sperimentale dell'SVR consiste in proiezioni di slide e di immagini di situazioni simulate con il software Radiance. La proiezione stereo offre l'opportunità di creare impressioni realistiche, osservate da soggetti attraverso lenti di ingrandimento.

I risultati hanno dimostrato una buona corrispondenza rispetto all'abbagliamento ed alla luminosità percepita.

Il **DGP – Daylight Glare Probability** è un indicatore che, come affermano gli stessi autori [101], è basato sulla probabilità che il soggetto provi la sensazione di fastidio da abbagliamento, anziché sulla misura o quantificazione del fenomeno. Tale probabilità è strettamente correlata all'illuminamento verticale in corrispondenza dell'occhio dell'osservatore. Inoltre, gli autori abbinano ai test per la definizione del DGP misure in campo con l'uso di una CCD camera, al fine di determinare correlazioni tra i valori delle luminanze nel campo di vista e le sensazioni di discomfort dei soggetti esaminati.

Il **Metodo di Valutazione del Comfort Visivo** è valido per definire il grado del discomfort da abbagliamento in una situazione di illuminazione naturale in condizioni riproducibili [102]. Le valutazioni dell'abbagliamento sono fatte da soggetti in un modello in scala, posti di fronte ad un cielo artificiale. Il massimo valore di luminanza del cielo artificiale è approssimativamente 7.000 cd/m².

Tale metodo fornisce come risultato un valore massimo accettabile per un certo grado di discomfort da abbagliamento per il cielo artificiale. Inoltre, può essere determinata la percentuale di soggetti che non accetta il discomfort da abbagliamento percepito per il lavoro quotidiano. Il metodo non può essere utilizzato per una valutazione assoluta del comfort visivo, ma permette di definire quale progettazione di illuminazione naturale risulta essere quella ottimale in termini di comfort visivo.

Gli **User Acceptance Studies** sono nuovi metodi proposti da Velds, nel 2000, per lo studio del discomfort da abbagliamento in ambienti a scala naturale, in condizioni di

illuminazione naturale. Questi studi sono basati sull'utilizzo di due sale prova, un questionario elettronico e misure continue, al fine di ottenere una relazione tra valutazioni soggettive e misure quantitative.

L'utilizzo delle sale è previsto affinché il soggetto non venga disturbato dalla presenza di apparecchiature di misura. Quindi in una sala si trova il soggetto, mentre nell'altra perfettamente uguale le attrezzature di misura.

Questi studi hanno la finalità di fornire delle scale di comfort visivo, in base alla percentuale di soggetti che considerano soddisfacenti determinate condizioni di illuminazione.

Infine, diversi studi hanno dimostrato che il DGI e il PGSV pur essendo forse i metodi più noti per la determinazione del grado di discomfort da abbagliamento da sorgenti di luce naturale, non solo forniscono valori maggiori del grado di discomfort rispetto a quelli determinati in condizioni reali [90], ma essi sono basati su esperimenti eseguiti per sorgenti di luce uniforme e, non è ancora ben chiaro, se possono essere utilizzati anche nel caso di sorgenti non-uniformi.

Ciò rappresenta uno dei limiti maggiori, per tutti gli indici finora descritti, dato che nella realtà, le finestre presentano, praticamente sempre, una distribuzione non-uniforme di luminanza.

2.2. Applicabilità ed affidabilità del DGI

Tra tutti gli indici di valutazione prima descritti, l'unico che risulta essere più diffuso e che è anche riconosciuto a livello normativo è il DGI. Tuttavia, la sua valutazione presenta difficoltà sia di carattere pratico che concettuale nell'acquisizione dei dati, sia relativi alle grandezze fotometriche, sia a quelle geometriche. ***In particolare, le difficoltà emergono quando si verifica una non uniformità di valori della luminanza dello sfondo o luminanza di background e per l'angolo solido, sia quello sotteso dalla sorgente, sia quello modificato in funzione della posizione della sorgente stessa nel campo di vista,*** quando si vuole fare direttamente riferimento all'immagine ottenuta mediante fotocamera.

Diverse ricerche hanno dimostrato che l'uso del DGI può comportare difficoltà sia di carattere pratico che concettuale, sia nell'acquisizione dei dati, sia nel fornire risultati poco affidabili.

Nella relazione del DGI, compaiono tre termini che si riferiscono a valori medi di luminanza, L_s , L_b ed L_w , non facilmente misurabili con un luminanzometro, oppure misurabili mediante tecniche videografiche, i cui risultati, tuttavia, non sono accurati come per le tecniche tradizionali, soprattutto per i valori lontani dall'asse ottico. In ogni caso, anche usando una fotocamera o una videocamera opportunamente tarata, è necessaria una successiva elaborazione dei dati per individuare le aree rispetto alle quali si effettua la media. In alternativa può essere possibile eseguire delle misure di illuminamento anziché di luminanza, utilizzando le tecniche formalizzate da Aizlewood [103] oppure da Nazzal [104], che impiegano dei sensori collocati su piani verticali, uno dei quali posto nel punto di osservazione ed opportunamente schermato con dei setti, in modo da ricevere la luce proveniente solo dalla finestra. Ovviamente tali tecniche di misura non possono tenere conto della presenza di zone a differente luminanza all'interno della finestra ed inoltre, una volta messo a punto, il sistema di schermatura è valido solo per una particolare geometria di finestra, peraltro centrata rispetto all'asse di vista. In alternativa, in fase di progetto, le luminanze possono essere valutate mediante strumenti di simulazione numerica ed anche in tal caso la valutazione di L_s , per quanto riguarda le ostruzioni ed il terreno, risulta complessa e difficoltosa.

Altra difficoltà consiste nella suddivisione dell'area finestrata in tre zone: cielo, ostruzione e terreno. Molto spesso infatti, risulta difficile distinguere, una volta individuata la porzione di cielo, le altre due zone, data la complessità dell'ambiente esterno, ed inoltre, più che in ostruzione e terreno, si dovrebbe suddividere la finestra in aree in cui la luminanza assume valori sufficientemente omogenei. Ma si è riscontrato che il numero di suddivisioni, ossia di addendi nella sommatoria nella relazione del DGI incide sul risultato finale.

Per quanto riguarda i parametri geometrici ω e Ω , non vengono indicati eventuali metodi per la loro valutazione, se non attraverso l'utilizzo di diagrammi che, però, riportano i valori relativi al solo caso in cui l'asse di osservazione sia perpendicolare alla finestra e passante per uno dei vertici inferiori della stessa [105].

Alcuni ricercatori [106] hanno mostrato che l'abbagliamento percepito in condizioni di cielo reale è minore di quanto predetto dal DGI. Due aspetti avrebbero potuto influenzare queste differenze:

- **differenze nelle procedure dell'esperimento.** Il DGI era ottenuto da risultati di esperimenti in cui i soggetti avevano un tempo di adattamento più lungo, il quale, per uguali valori di luminanza del cielo, può portare a più bassi gradi di discomfort da abbagliamento;
- **differenze culturali.** Le valutazioni in condizioni di cielo reale furono ottenute in esperimenti con soggetti Giapponesi. Gli esperimenti del DGI furono condotti con soggetti Europei ed Americani. La ricerca ha mostrato che i Giapponesi sono più tolleranti all'abbagliamento, degli Americani e degli Europei [92, 107].

Boubekri e Boyer [108] determinarono alcune differenze tra la valutazione in condizioni di cielo reale e quelle definite dal DGI. Infatti, molti dei soggetti delle prove eseguite non avevano una finestra nel loro luogo di lavoro o la vista della situazione testata era attraente e piacevole. Entrambi gli aspetti possono aver influenzato significativamente le valutazioni.

Inoue e Itoh [95] hanno mostrato che il DGI non è affidabile nei seguenti casi:

- la sorgente copre tutto il campo di vista dell'osservatore;

- quando la luminanza di background è uguale alla luminanza della sorgente. Il DGI dovrebbe essere indipendente, dal momento che nessuna distinzione può essere fatta tra la sorgente abbagliante ed il background.

Waters et al. [109] hanno mostrato che sorgenti di luce non uniformi possono causare un abbagliamento maggiore rispetto a sorgenti di luce uniforme, se posizionate perpendicolarmente alla linea di vista e meno abbagliamento se posizionate tra i 10° e i 20° dalla linea di vista. Il DGI è basato su esperimenti con sorgenti di luce uniforme [110] e per tale motivo non dovrebbe essere utilizzato per sorgenti di luce non uniformi.

2.3. *Messa a punto di un sistema innovativo per la misura delle luminanze del campo di vista*

Lo studio e l'approfondimento dei diversi indicatori di performance dell'illuminazione degli ambienti confinati, sia sotto il profilo energetico, sia per il comfort visivo, ha permesso di verificare l'esistenza di limiti e difficoltà pratiche nell'applicazione degli stessi metodi di valutazione.

In particolare, si è visto che la valutazione del DGI risulta non molto semplice ed immediata, per la determinazione sia dei parametri geometrici (angolo solido e indice di posizione), sia dei valori di luminanza, che peraltro va eseguita nel minor tempo possibile, data la variabilità della sorgente naturale.

I valori delle luminanze presenti nella relazione del DGI non sono facilmente misurabili con un luminanzometro tradizionale.

Al fine di superare i limiti e risolvere le criticità applicative degli indici di comfort visivo, la presente ricerca si è focalizzata sulla messa a punto di un sistema per analizzare il campo di vista, basato sulla tecnica HDR (High Dynamic Range).

Sulla base di tali risultati e considerazioni, si è ritenuto opportuno definire, implementare e mettere a punto un sistema che non solo catturasse l'immagine istantanea della sorgente abbagliante con un'opportuna ampiezza del campo di vista, ma che fornisse in output tutti i parametri, sia geometrici, sia fotometrici necessari alla valutazione del comfort visivo.

In tal modo è possibile superare le problematiche e le criticità relative alla raccolta dei dati geometrici e fotometrici permettendo una valutazione dell'ambiente luminoso sotto il profilo del comfort visivo, sia in fase di progettazione, sia di verifica.

È stato sviluppato nel laboratorio di illuminotecnica del DETEC un innovativo sistema di misura delle luminanze, costituito da una fotocamera digitale che, con il supporto di un software scritto in ambiente MATLAB, secondo la tecnica dell'analisi HDR (High Dynamic Range) delle immagini, permette di catturare e di definire i valori di luminanza presenti nel campo di vista nell'istante di cattura dell'immagine.

Il sistema consiste di una fotocamera CANON EOS 20D dotata di filtro fotopico e di un obiettivo zoom 16 - 35 mm, con minima apertura del diaframma F 2.8. La catena di misura prevede l'acquisizione di tre immagini in bianco e nero a 8 bit, con risoluzione di 1.152 x 1.728 pixel, che vengono successivamente elaborate con il programma Matlab, attraverso una serie di comandi, opportunamente compilati, con i quali i livelli di grigio vengono trasformati in valori di luminanza, per ottenere infine una mappa di luminanze ad ampio range dinamico.

La taratura fotometrica (Fig. 12, 13) si articola su tre differenti tempi di acquisizione: 1/500s, 1/15s e 2s, a ciascuno dei quali corrisponde una specifica funzione di taratura con un determinato range di validità; le tre curve insieme coprono un intervallo di luminanza che si estende tra 0 e 31.000 cd/m².

Tale limitazione, dovuta alla lampada campione di luminanza e non alla fotocamera, può essere superata estendendo il range di validità della funzione di taratura a 1/500s a valori superiori. Ci riproponiamo, naturalmente, di validare tale estensione in futuro, con l'acquisizione di un campione di luminanza di maggiore potenza.

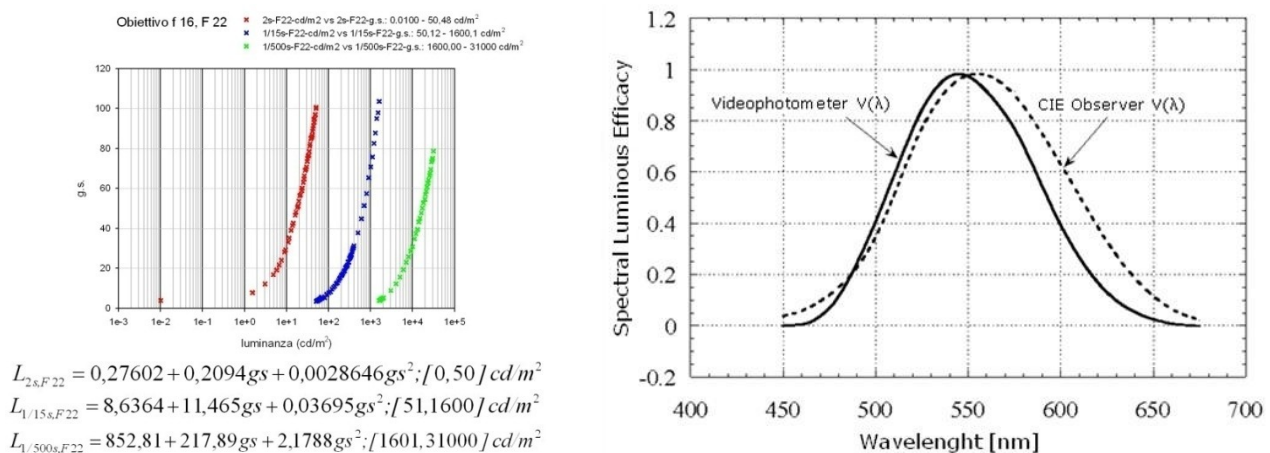


Figura 12 - Taratura fotometrica

Ma la vera novità del sistema, rispetto a quelli precedentemente messi a punto, consiste nella taratura geometrica che abbina a ciascun pixel il rispettivo valore di angolo solido e di angolo solido corretto secondo l'indice di posizione di Guth (position index). Essa permette di definire, non solo l'ampiezza dell'angolo solido relativo ad una qualsiasi area inclusa nell'immagine, ma anche la prossimità di tale area rispetto all'asse di vista.



Figura 13 - Attrezzature per la taratura fotometrica



Figura 14 - Banco fotometrico

Per la taratura geometrica, la fotocamera è stata montata su un banco ottico a 12 cm da un'immagine campione composta da 308 quadranti di 1cm x 1cm ciascuno (Fig. 14), non tutti completamente inquadrati. Con il software Image Pro Plus è stata fatta un'analisi statistica dei pixel contenuti in ciascun quadrante e grazie ad un codice di calcolo da noi sviluppato in Visual Basic (Fig. 15), ad ogni quadrante è stato abbinato il rispettivo angolo solido e angolo solido corretto.

Il sistema di calibrazione (Fig. 14, 16, 17) permette di valutare l'angolo solido per ciascun quadrante, non solo per il suo posizionamento all'interno del campo di vista, ma anche per l'effetto del vignetting, cioè la contrazione ottica che l'immagine subisce in maniera differenziata tra l'asse ottico e le zone più periferiche dell'inquadratura. In questo modo sono state identificate cinque zone con differente rapporto pixels/quadrante per il quale dividere il relativo valore dell'angolo solido al fine di ottenere

l'effettivo angolo solido coperto da ciascun pixel. La stessa cosa è stata fatta per l'angolo solido corretto. Ne sono risultate due matrici di 1.152×1.728 , una per i valori di angolo solido ed una per i valori di angolo solido corretto.

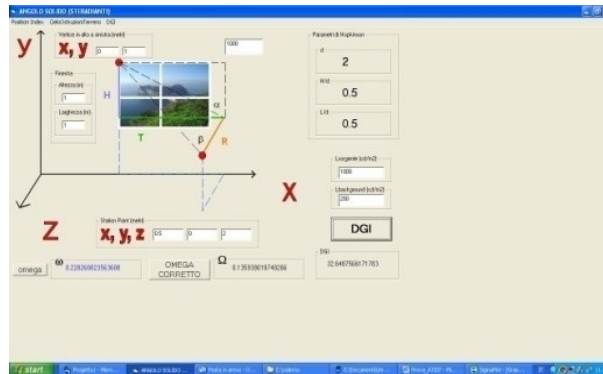


Figura 15 - Software per il calcolo dell'angolo solido

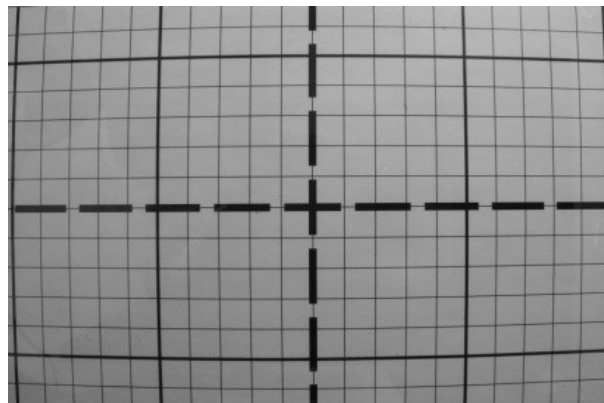


Figura 16 - Pannello di calibrazione



Figura 17 - Suddivisione dei quadranti per zone

Il software per l'analisi e l'elaborazione è stato compilato interamente in Matlab. In una prima fase esegue l'elaborazione delle immagini, trasformando i valori di ciascun pixel, acquisiti in scala di grigio a 8 bit, nei valori di luminanza in cd/m^2 ed esegue la correzione del vignetting sui valori di luminanza. Successivamente le tre immagini

distinte concorrono alla formazione di una quarta immagine ad ampio range dinamico (Figura 18). In un terzo step è possibile analizzare la matrice finale ed ottenere diversi dati statistici e puntuali dell'immagine, sia fotometrici che geometrici. È possibile, impostando in input determinati range di luminanza, individuare il sottoinsieme dei pixel che ricadono in ciascun range e calcolarne la luminanza media, l'angolo solido e l'angolo solido corretto.

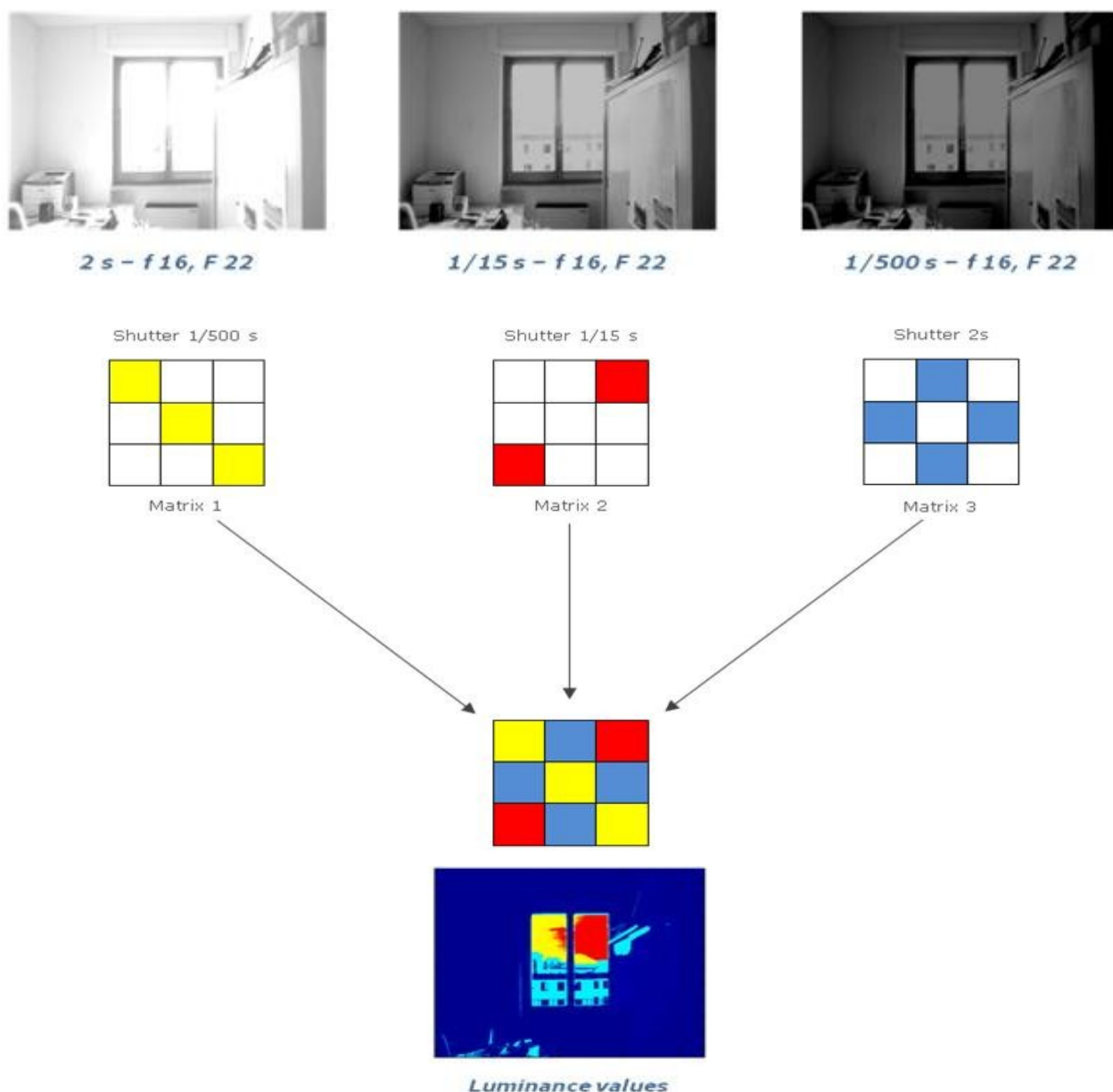


Figura 18 - Formazione dell'immagine ad ampio range dinamico



Figura 19 – Sorgente di luce naturale oggetto di studio

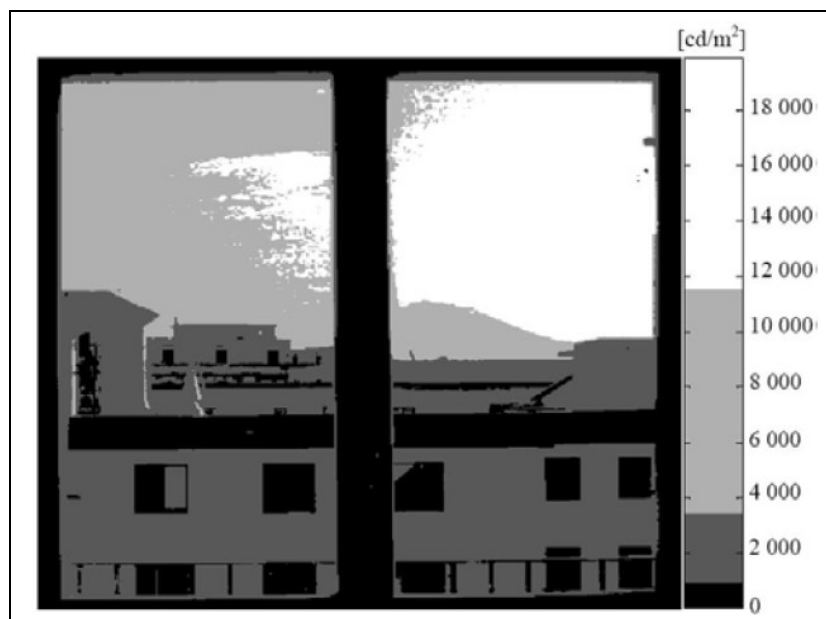


Figura 20 - Mappatura delle luminanze della sorgente oggetto di studio

Il sistema permette una valutazione generale dell'ambiente luminoso, sia in caso di illuminazione naturale sia artificiale. Sono possibili misure di luminanza, ma considerando un comportamento lambertiano delle superfici, e disponendo dei fattori di riflessione delle stesse, attraverso la relazione $L = (E \times \rho)/\pi$, è possibile rilevare anche l'illuminamento su prefissati "target".

Il sistema può essere impiegato per la valutazione della qualità dell'ambiente luminoso, implementando, direttamente nella catena di misura ed elaborazione dei dati geometrici e fotometrici, le relazioni per definire gli indici di valutazione, come i rapporti di luminanza, i rapporti di illuminamento e qualunque tipo di indice di abbagliamento.

In particolare, il sistema è stato testato in campo per il calcolo automatico dell'indice di abbagliamento con la formula sviluppata presso la Cornell University, ottenuta modificando la formula BRS per la valutazione dell'abbagliamento da sorgenti di dimensioni ridotte. Tale formula, che fornisce un indice di abbagliamento da luce naturale, il "Daylight Glare Index" (DGI), è da sempre risultata di difficile applicabilità per le particolari esigenze di misurazione della luminanza di superfici estese che, nelle applicazioni in campo, possono presentare distribuzioni di luminanza anche particolarmente complesse. Vi era, inoltre, l'ulteriore problema rappresentato dalla necessità di avere una misura contemporanea sull'intera superficie, visto il carattere mutevole della luce naturale anche nel breve periodo. Il sistema messo a punto permette di superare le criticità delle misurazioni fotometriche, fornendo al tempo stesso anche i parametri geometrici necessari al calcolo. Ciò ha permesso, pertanto, di facilitare la misura dell'indice di abbagliamento, consentendo confronti e valutazioni in campo, utili sia dal punto di vista progettuale sia di ricerca.

3. APPLICAZIONI IN CAMPO DEL SISTEMA DI VALUTAZIONE MESSO A PUNTO

Introduzione

Il sistema di misura e valutazione del campo di vista messo a punto presso il laboratorio di illuminotecnica del DETEC costituisce un valido strumento non solo per analisi geometriche e fotometriche di carattere generale, ma anche per la verifica dell'affidabilità e dell'applicabilità di indici di valutazione come il DGI.

Oggigiorno, sebbene il DGI sia il principale indice di valutazione del discomfort da abbagliamento psicologico, la sua applicazione presenta alcuni limiti, in particolare per sorgenti con livelli di luminanza non uniformi:

- **Limiti di carattere strumentale:** nell'espressione del DGI (1), i valori di luminanza ed angolo solido non sono molto semplici da misurare con strumenti tradizionali [111].

I parametri geometrici ω e Ω possono essere valutati attraverso l'uso di diagrammi che non risultano validi se l'asse di vista non è perpendicolare alla finestra e passante per uno degli angoli inferiori della finestra. Numerosi sono i casi in cui l'asse di vista non è perpendicolare alla finestra [109].

- **Limiti di carattere interpretativo:** la suddivisione dell'area della finestra in tre zone (cielo, ostruzione e terreno) può essere un'eccessiva semplificazione. In molti casi reali, infatti, la non uniformità di ciascuna area può fornire risultati non corretti e contrastanti. La superficie della finestra potrebbe essere suddivisa in aree omogenee, ma il criterio per farlo non è propriamente chiaro [89]. Gli studi condotti presso il laboratorio del DETC dell'Università di Napoli "Federico II", basati sull'analisi dell'immagine HDR (Figure 21 e 22) [112] hanno dimostrato risultati differenti in funzione della suddivisione dell'area della finestra (Tabelle 5 e 6). Quindi il numero delle suddivisioni influisce sul risultato finale.

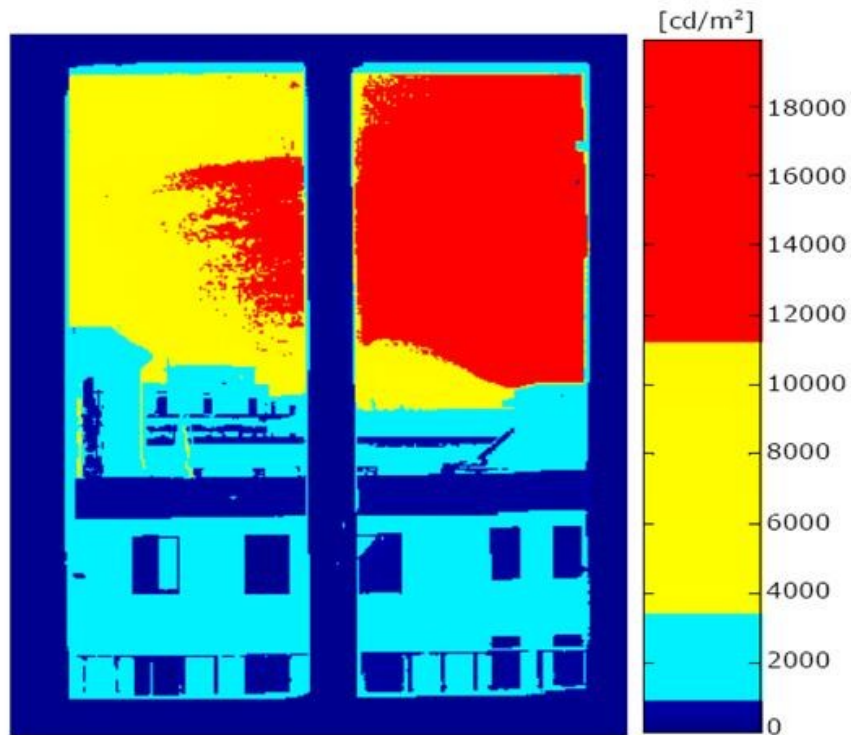


Figura 21 - Mappa della luminanza della finestra



Figura 22 - Mappa della luminanza del background

Nel primo caso (Tabella 5) la finestra è suddivisa in cielo, ostruzione e terreno, mentre nel secondo caso (Tabella 6), il range di luminanza è suddiviso in quattro intervalli con luminanze omogee. I valori del DGI ottenuti nei due casi sono differenti.

Tabella 5 - Dati standard di input per il DGI

	Range [cd/m ²]	L _{si} [cd/m ²]	ω_i	Ω_i	G _i
Sky	3421÷19923	11723	0,10	0,09	488
Obstruction	0÷3420	1167	0,16	0,13	16
Ground	-	-	-	-	-
ω	0,26				
L _w	5662				
L _b	260				
G	504				
DGI	27				

Tabella 6 - Dati modificati di input per il DGI

	Range [cd/m ²]	L _{si} [cd/m ²]	ω_i	Ω_i	G _i
Sky1	3421÷11200	9226	0,05	0,04	174
Sky2	11201÷19923	13859	0,06	0,05	399
Obstruction1	0÷623	333	0,05	0,04	1
Obstruction2	624÷3420	1600	0,10	0,09	20
ω	0,26				
L _w	5662				
L _b	260				
G	594				
DGI	28				

Anche altre ricerche, come quelle di Wienold e Christoffersen, sulla definizione del DGP hanno dimostrato che l'uso di tecnologie come la CCD-camera permette di ottenere una mappatura delle luminance del campo di vista, superando i limiti dei tradizionali strumenti di misura [101]:

- **Limiti concettuali:** nella formula del DGI l'ambiente circostante la sorgente non è propriamente considerato. A parte la luminanza, l'angolo solido del background non è considerato.
- **Limiti di valutazione:** la sensibilità all'abbagliamento è modificabile. Alcuni ricercatori [106] hanno dimostrato che l'abbagliamento percepito in condizioni reali di cielo era inferiore a quello previsto dal DGI. Anche le differenze etniche dei soggetti influiscono sulla valutazione in condizioni reali di cielo. I soggetti asiatici sembrano essere più tolleranti all'abbagliamento rispetto a quelli Europei [107].

3.1. Analisi e prove eseguite per il comfort visivo

Molti aspetti degli indici di valutazione del discomfort da abbagliamento necessitano ulteriori approfondimenti e ricerche. In letteratura non sono presenti dati sperimentali sufficienti, sia per condizioni reali, sia simulate.

Nella presente ricerca è stato preso come riferimento uno studio condotto da W. Kim, H. T. Ahn e J. T. Kim. [113] per ulteriori confronti, al fine di verificare l'applicabilità e l'affidabilità del DGI e di confermare la necessità di prendere in considerazione la variabilità della percezione del discomfort da abbagliamento molesto a seconda dei soggetti.

Lo studio di Kim et al. è basato su "test percettivi" dove l'abbagliamento è espresso da un "*Degree of Discomfort Glare*" (Grado di Discomfort da Abbagliamento molesto) (DDG). Il piano della finestra è stato diviso in due parti, quella superiore che rappresenta la porzione di cielo (L_{up}) e quella inferiore che rappresenta le ostruzioni (L_{down}), come mostrato in Figura 23. La finestra è stata posizionata in uno "sky dome" e la luminanza del background corrisponde alla luminanza media dello sky dome.

Le condizioni di test di Kim et al. sono state utilizzate per paragonare i risultati del DDG con il DGI calcolato nelle stesse condizioni attraverso un software appositamente creato per la simulazione dell'abbagliamento da luce naturale.

Inoltre, il confronto è stato eseguito per diverse valutazioni dei parametri che compongono la relazione del DGI:

- a) *Standard method* – Il valore della luminanza L_w è stato calcolato (Figura 23) come la luminanza media dell'intera finestra, pesata rispetto alle relative aree di cielo, ostruzione e terreno, attraverso la relazione:

$$L_w = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{\omega_{tot}} \frac{L_i}{N} \quad (2)$$

dove N è il numero delle sorgenti.

I risultati sono riportati in (Figura 24).

- b) *First method* – La luminanza L_s è stata posta pari alla luminanza L_w , quest'ultima calcolata in accordo con la (2). È stata presa in considerazione solo una G_i ,

nell'ipotesi che fosse possibile considerare la finestra con una luminanza uniforme, con un valore di luminanza medio, pesato secondo l'angolo solido. Il DGI calcolato secondo tale metodo è riportato in Figura 25.

c) *Second method* – Le due parti della finestra sono state considerate come due sorgenti separate, ciascuna con una distribuzione uniforme della luminanza. Quindi, sono stati fissati i seguenti parametri:

- $L_{s1} = L_{w1} = L_{up}$
- $L_{s2} = L_{w2} = L_{down}$

I risultati sono riportati in Figura 26.

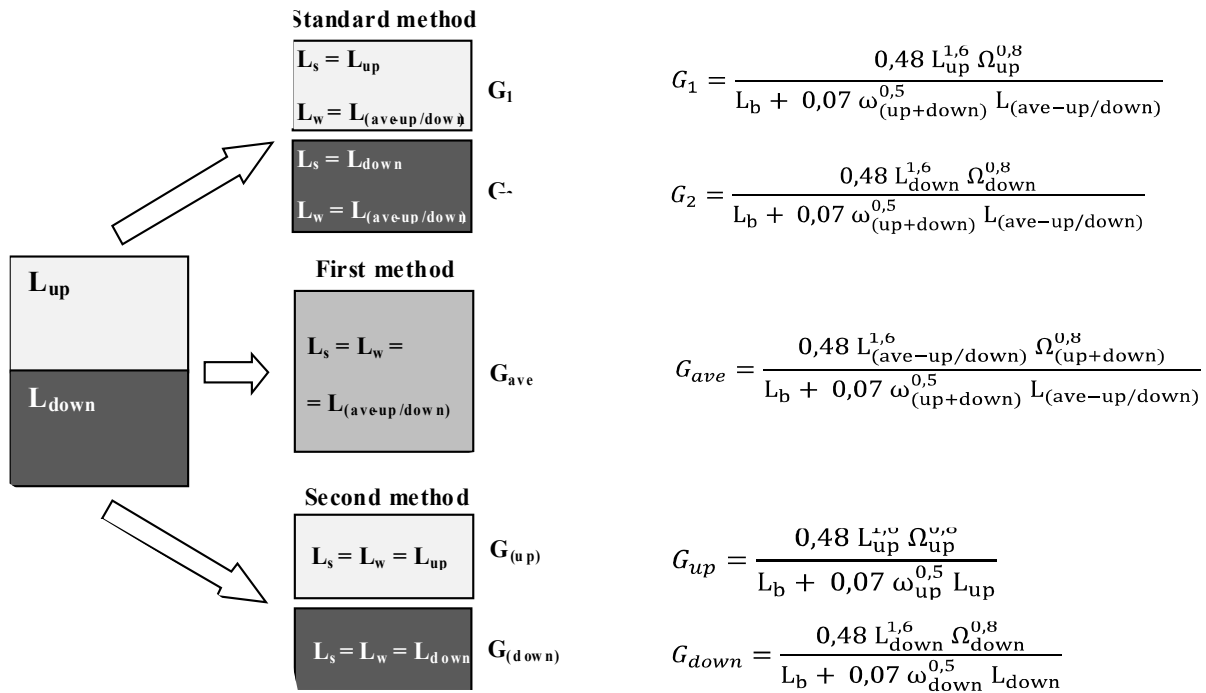


Figure 23 – Suddivisione dell'area della finestra e schemi dei tre differenti metodi di valutazione del DGI, con le relative relazioni analitiche utilizzate nelle prove

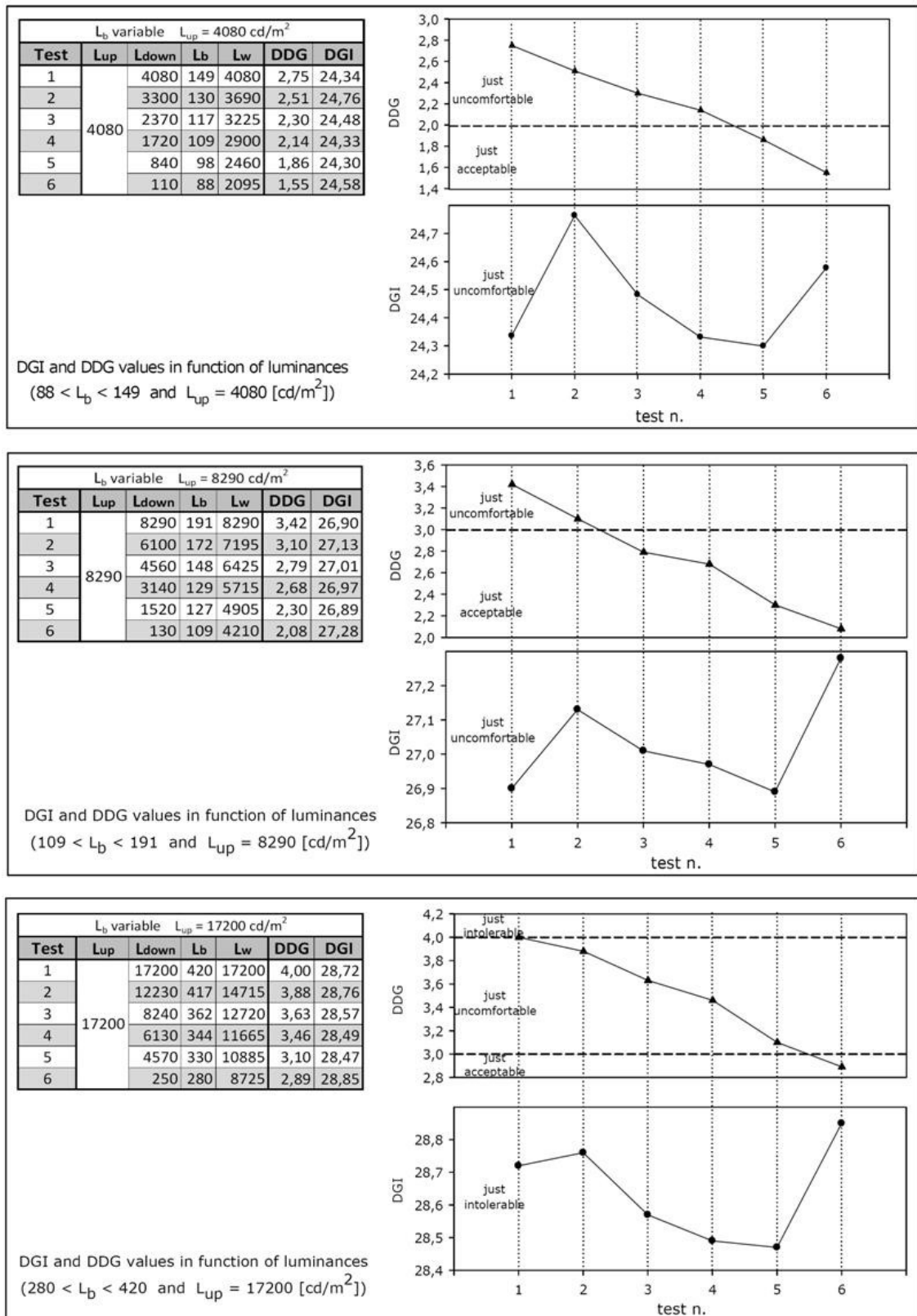


Figure 24 – “standard method” – L_b variabile $[\text{cd/m}^2]$ - Risultati ottenuti confrontando I valori del DDG [113] con quelli del DGI calcolati attraverso simulazioni con tre valori fissati di L_{up} e variando L_b . L_w è la media di L_{up} e L_{down}

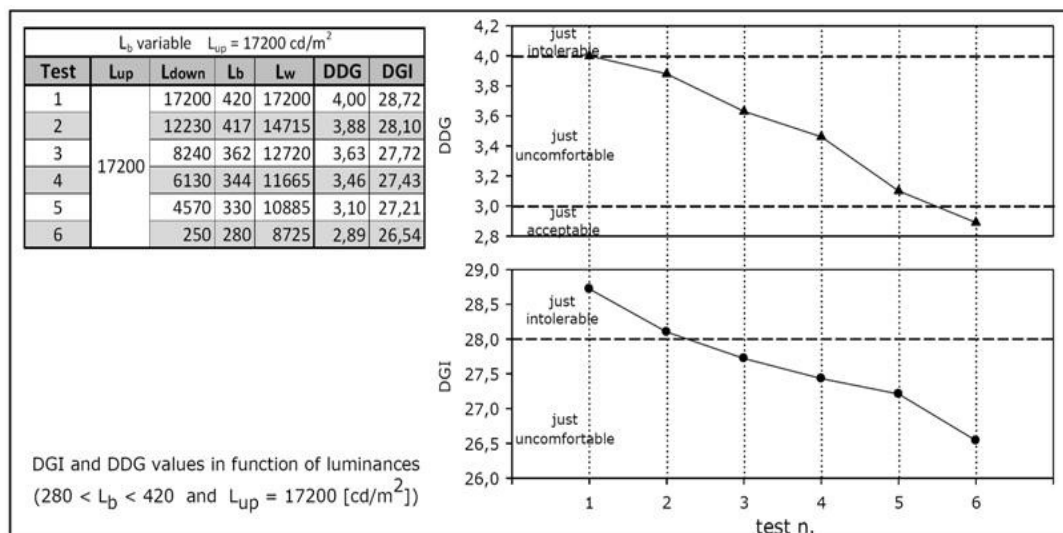
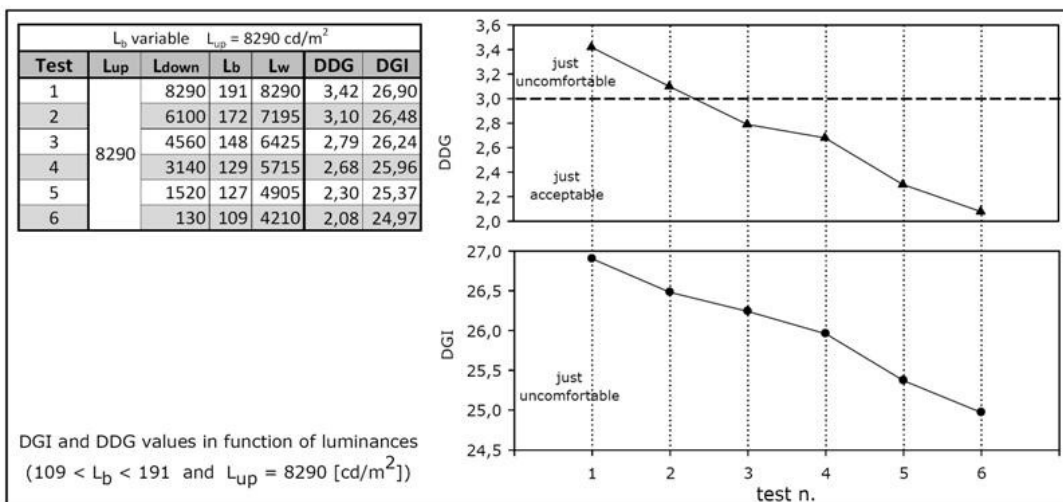
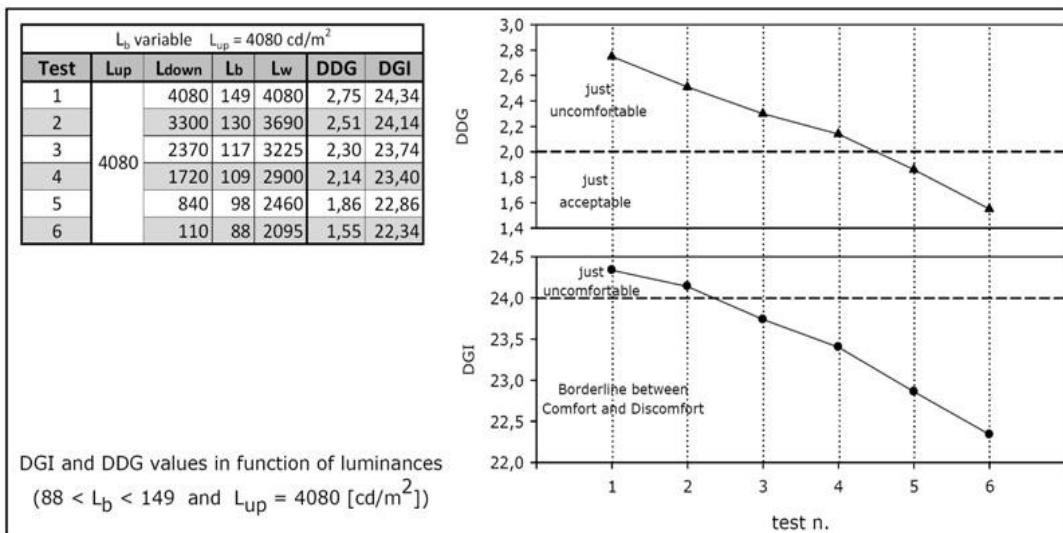


Figure 25 – “first method” – L_b variabile [cd/m²] - Risultati ottenuti confrontando I valori del DDG [113] con quelli del DGI calcolati attraverso simulazioni con tre valori fissati di L_{up} e variando L_b

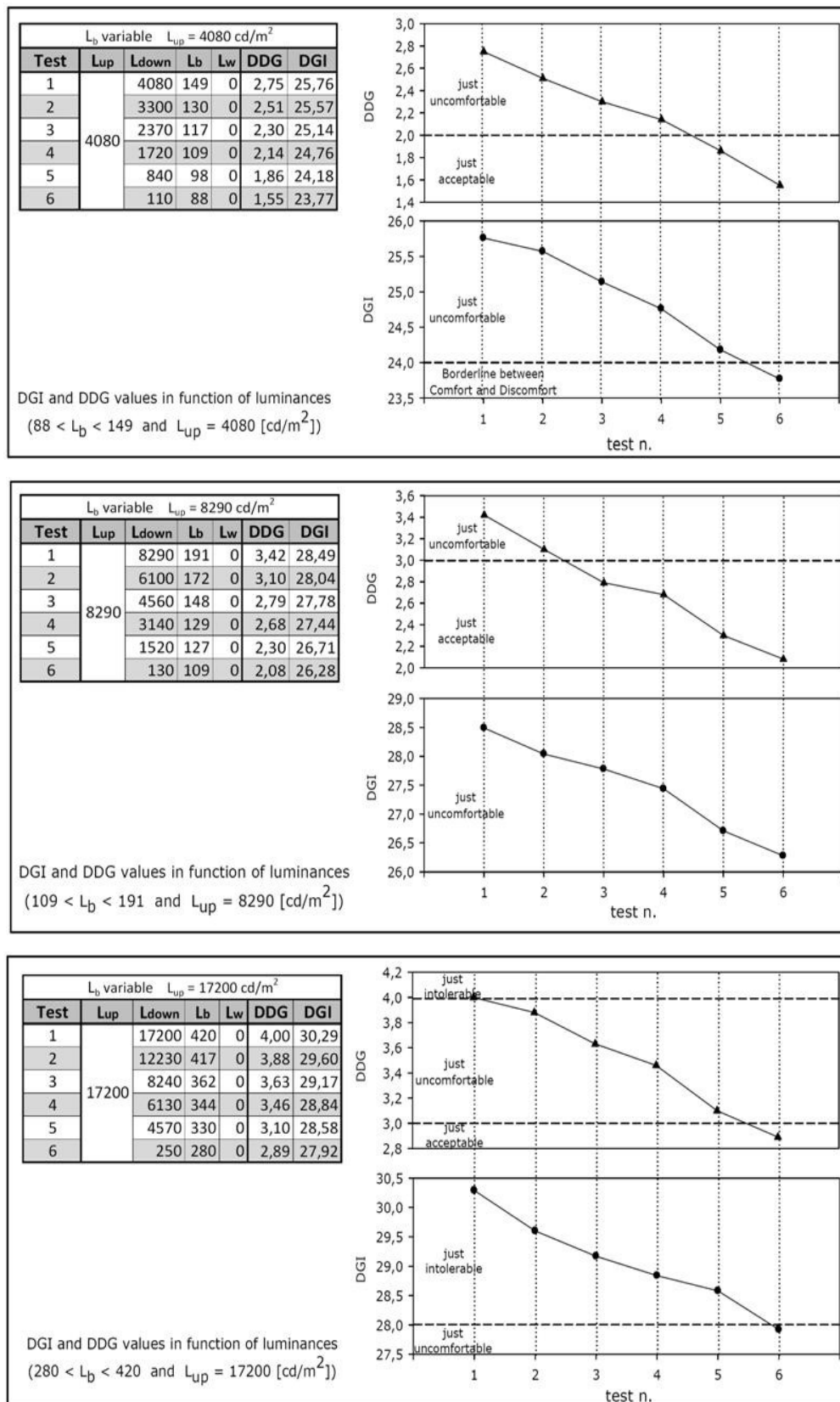


Figure 26 – “second method” – L_b variabile [cd/m²] - Risultati ottenuti confrontando I valori del DDG [113] con quelli del DGI calcolati attraverso simulazioni con tre valori fissati di L_{up} e variando L_b

Tutti i risultati appena visti mostrano che esiste una considerevole distanza tra il DGI ed il DDG applicati agli stessi casi. Mentre per il "first" e per il "second method" c'è un problema di scostamento della scala di valutazione, lo "standard method" fornisce risultati completamente differenti ed assolutamente non confrontabili con quelli del DDG.

In particolare, la Figura 22 mostra come il DGI presenti un andamento non solo distante dal DDG, ma per di più non coerente con la definizione del discomfort glare che, concettualmente, al diminuire dei valori di luminanza della sorgente dovrebbe devrescere, come avviene per il DDG.

3.2. Analisi e prove eseguite per il risparmio energetico

Il LENI (Lighting Energy Numeric Indicator) (EN 15193 : 2007) è un parametro che rappresenta il consumo energetico annuo per metro quadrato dovuto all'illuminazione e comprende anche le aliquote dovute al funzionamento delle apparecchiature di controllo, per l'illuminazione di emergenza e l'esercizio in standby. Il LENI dipende dalle potenze installate e dal tempo di funzionamento delle varie apparecchiature durante il periodo di osservazione, che può essere mensile o annuale in base alla procedura di calcolo adottata, ma tiene conto anche di vari altri fattori riduttivi quali la presenza di luce naturale, l'adozione di sistemi di controllo e di gestione, nonché la manutenzione.

L'energia totale W , richiesta in un anno in ciascuna zona, viene calcolata mediante la relazione:

$$W = W_L + W_p \quad [\text{kWh/anno}] \quad (3)$$

essendo:

$$W_L = \sum \{ (P_n \cdot F_c) \cdot [(t_D \cdot F_o \cdot F_D) + (t_N \cdot F_o)] \} / 1000 \quad [\text{kWh/anno}] \quad (4)$$

$$W_p = \sum \{ \{ P_{pc} \cdot [t_y - (t_D + t_N)] \} + (P_{em} \cdot t_{em}) \} / 1000 \quad [\text{kWh/anno}] \quad (5)$$

Il LENI è posto pari a W/A ,

con A pari all'area della superficie dell'edificio oggetto di valutazione [m^2].

Nelle equazioni (4) e (5), tutti i termini relativi alle potenze installate, P_n , P_{pc} e P_{em} , nonché quelli che si riferiscono alle ore di funzionamento: t_N , t_D , t_y e t_{em} sono immediatamente valutabili, mentre i fattori F_o , F_D e F_c , dipendono a loro volta da altri parametri ed il loro valore può modificare il fabbisogno di energia e dunque il LENI.

Le potenze installate, con particolare riferimento a P_n , derivano da una corretta progettazione [114] dell'impianto di illuminazione nel rispetto della norma europea [115]. Tale norma, oltre a riportare i valori minimi di riferimento per quanto riguarda l'illuminamento medio e l'uniformità di illuminamento sia nell'area del compito visivo, sia in quella della zona immediatamente circostante, considera anche aspetti

riguardanti la qualità del sistema di illuminazione, quali la resa cromatica delle sorgenti, l'apparenza del colore ed il modellato.

Nel rispetto della EN 12464-1, la potenza installata può variare, anche notevolmente, in dipendenza dei seguenti parametri:

- efficienza luminosa delle lampade e del sistema di alimentazione;
- efficienza dell'apparecchio illuminante (LOR – Light Output Ratio);
- fattore di utilizzazione dell'installazione;
- manutenzione e caratteristiche ottiche dell'ambiente.

Quindi, al di là della mera applicazione della EN 15193 ed al ricorso a diverse tecniche orientate alla riduzione dei consumi, alla base di ogni strategia di risparmio energetico vi è una corretta progettazione dell'impianto [116].

Al fine di individuare delle strategie progettuali orientate al risparmio energetico, si è esaminato un caso studio, calcolando il LENI nelle reali condizioni di funzionamento, secondo la procedura indicata dalla norma. Si sono eseguite analisi di sensibilità per valutare l'impatto che i diversi parametri, descrittivi del contributo della luce naturale e le caratteristiche del sistema di controllo, hanno sulla stima dei consumi dovuti all'illuminazione. Le stesse valutazioni si sono eseguite tenendo conto in modo più accurato del contributo della luce naturale, con l'utilizzo dei dati relativi alle condizioni locali di cielo durante un anno tipo.

Il caso studio riguarda un locale del DETEC (Dipartimento di Energetica, TERmofluidodinamica applicata e Condizionamenti ambientali) della Facoltà di Architettura di Napoli, Via Forno Vecchio, 36, adibito ad attività formative di gruppo in ambito universitario. Su uno dei due lati più lunghi, orientato ad Ovest sono presenti due porte finestre di dimensioni rispettivamente ($h_{L,1} \times l_1$) 2,60 m x 2,15 m e ($h_{L,2} \times l_2$) 2,60 m x 2,18 m. L'impianto di illuminazione è costituito da sei plafoniere a soffitto appartenenti ad un unico gruppo di controllo, in ciascuna delle quali sono installate due lampade fluorescenti lineari T12 da 36 W ciascuna, per una potenza nominale installata di 432 W. Due delle plafoniere sono dotate di modulo per luci di emergenza con potenza elettrica di ricarica complessiva di 4 W. Non esistono controlli automatici

ma un unico controllo manuale on/ off per l'accensione e per lo spegnimento degli apparecchi.

La scena esterna è costituita da alcuni edifici di varie altezze, dall'aggetto del solaio di copertura (il locale è collocato all'ultimo piano) e da una porzione di cielo.

Per valutare le ore di utilizzo annuo del locale si è fatto riferimento al calendario accademico dell'Università degli Studi di Napoli Federico II, considerando in media una fascia oraria tra le 8:00 e le 17:00, in cui è potenzialmente disponibile la luce naturale ed una compresa tra le 17:00 e le 20:00, in cui l'illuminazione del locale è affidata esclusivamente alla luce artificiale.

Ai fini del calcolo del fattore di dipendenza dalla luce naturale F_D , l'area di ciascun locale viene suddivisa in zone esposte alla luce naturale e zone non esposte, in funzione della localizzazione e della geometria dei varchi di luce naturale (finestre o lucernai). Per ciascuna finestra, le dimensioni dell'area esposta dipendono da $\Delta h = h_{Li} - h_{Ta}$, cioè dalla differenza di quota tra la plattabanda superiore ed il compito visivo, che nel caso studio è collocato a 0,85 m dal pavimento, nonché dalla larghezza della finestra stessa, l .

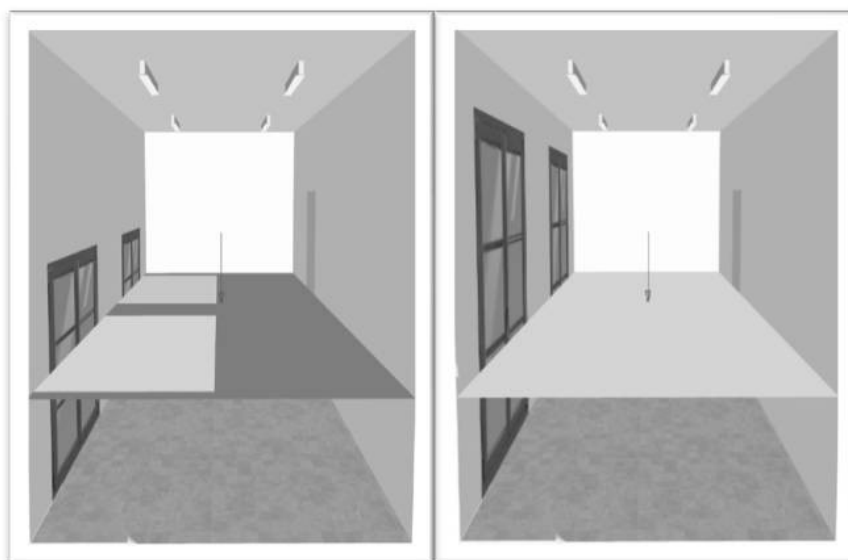


Figura 237 - Area esposta e non esposta al variare di Δh

In particolare, la profondità dell'area esposta a_D è $2,5 \cdot \Delta h$ e, quando raggiunge l'80% della profondità dell'intero locale, si pone pari alla profondità del locale stesso. L'area esposta può quindi variare tra una ristretta fascia adiacente alla finestra considerata,

fino a comprendere l'intera area del locale. Si osservi che, nel calcolo delle aree esposte, così come in tutta la procedura, la parte di finestra che ricade al di sotto della superficie utile non viene considerata.

Una volta individuate le zone esposte, tutte le restanti aree rispetto all'intera superficie utile sono classificate come non esposte. Per ciascuna area esposta viene calcolato un fattore medio di luce diurna D , in funzione del quale viene definito il livello di penetrazione della luce naturale che può essere elevato, medio, scarso o nullo.

Nella norma viene indicata una procedura semplificata per il calcolo del fattore di luce diurna, come prodotto del fattore medio di luce diurna dovuto alla "carcassa" (tenendo conto dello squarcio in assenza dell'infisso) D_c , dipendente dalla geometria dell'apertura e dalle ostruzioni ed oggetti esterni in relazione alla zona esposta e di fattori descrittivi dell'infisso:

$$D = D_c \cdot \tau_{D65} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (6)$$

Per ciascuna zona, in relazione al tipo di compito visivo o di attività ed in accordo con la EN 12464-1, viene definito l'illuminamento medio mantenuto ed assegnato un fattore di dipendenza dalla luce naturale, $F_{D,n}$. Tale fattore, compreso tra 0 ed 1, assume il valore unitario nelle zone non esposte o con livello di penetrazione della luce naturale nullo, mentre decresce al crescere del livello di penetrazione. Il valore di $F_{D,n}$, dipende anche dall'illuminamento medio mantenuto e dalla latitudine del luogo, nonché dalla presenza o meno di un sistema o di una strategia di controllo per quanto riguarda l'integrazione luce naturale/ artificiale.

Tabella 7 – Caratteristiche del locale oggetto del caso studio

L	7,70 m	$\rho_{\text{ostr.esterne}}$	60% (stimato)	F_A	0,3	τ	0,90
P	3,90 m	E_m	500 lux	F_{OC}	1	k₁	0,70
H	3,00 m	γ_{Napoli}	40,8°	I₀	0,417	k₂	0,80
h_{Ta}	0,85 m	$\rho_{\text{(pavimento)}}$	50 % (misurato)	MF	0,80	k₃	0,85
t_{em}	8760 h	$\rho_{\text{(pareti)}}$	70 % (misurato)	P_n	432 W	$\gamma_{0,OB}$	28°
t_y	8760 h	$\rho_{\text{(soffitto)}}$	80 % (misurato)	P_{em}	4 W	$\gamma_{0,OV}$	42°
t_D	2340 h	t_N	780 h	P_{PC}	0 W	$\gamma_{0,OF}$	0°

Mediante un foglio di calcolo opportunamente costruito seguendo le procedure descritte dalla normativa, è stato valutato il LENI per il locale oggetto di studio, in cui l'area esposta alla luce naturale risulta coincidente con quella del locale stesso. Il livello di penetrazione della luce naturale, ottenuto calcolando il fattore di luce diurna secondo normativa, è risultato scarso, per cui, data anche l'assenza di sistemi automatici di integrazione tra la luce artificiale e naturale, quest'ultima risulta utilizzata in maniera non ottimale.

Secondo la procedura indicata in normativa è possibile ridurre i consumi, non soltanto attraverso il contributo della luce naturale, ma anche tenendo conto di due aspetti distinti connessi all'utilizzo di sistemi di controllo automatico.

Il primo riguarda l'effettiva presenza di individui all'interno del locale, a prescindere dalla pianificazione oraria programmata, di cui si tiene conto mediante il fattore di occupazione F_o , dipendente a sua volta dal fattore F_A di assenza relativo alla destinazione d'uso del locale e dal fattore F_{oc} legato al tipo di controllo di presenza. Quest'ultimo varia dal sistema meno efficiente con interruttore manuale on/ off, al sistema più efficiente, manuale on/ auto off.

Il secondo aspetto si riferisce, invece, alla presenza di un sistema di controllo ad illuminamento costante che influisce sul fattore di manutenzione, MF. In genere, infatti, la potenza installata deve essere opportunamente maggiorata per tenere conto della riduzione nel tempo del flusso luminoso e, conseguentemente, anche gli illuminamenti nel periodo iniziale di funzionamento dell'impianto sono maggiorati. In tal modo si raggiungono i valori previsti dal progetto dopo un periodo pari all'intervallo di manutenzione, durante il quale si verifica un progressivo decadimento del flusso luminoso. In presenza di un sistema di controllo ad illuminamento costante è possibile limitare il flusso luminoso a quello strettamente necessario al mantenimento degli illuminamenti richiesti, ottenendo un ulteriore risparmio energetico.

Nel caso esaminato, l'impianto dispone di un semplice interruttore on/ off a comando manuale. Mediante il foglio di calcolo sono stati valutati i tre fattori $F_{D,n}$, F_o , F_c , che conducono ad un consumo calcolato ($W_L + W_P$) pari a 1.146 kWh/anno e un LENI di 38,2 kWh/m² anno. I risultati sono riassunti nella Tabella 8.

Il risparmio ottenuto dall'utilizzo della luce naturale (9%) risulta di poco inferiore a quello conseguito attraverso il sistema di gestione di presenza/assenza (11%).

Tabella 8 – Risultati relativi al caso studio

Simbolo	Descrizione	Valore	% risparmio
$F_{D,n}$	Fattore di dipendenza da luce naturale (zona)	0,89	Considerando $F_{D,n} = 1$ si avrebbe un consumo di 1248 kWh rinunciando a un risparmio di 102 kWh, 9% del totale
F_o	Fattore di dipendenza dall'occupazione	0,90	Considerando $F_o = 1$ si avrebbe un consumo di 1270 kWh rinunciando a un risparmio di 123 kWh, 11% del totale
F_c	Fattore di controllo di illuminamento	1,00	Non è presente alcun sistema di controllo di illuminamento
LENI = 38,2 kWh/m ² anno		LENI limite * = 34,9 kWh/m ² anno	

Il progetto illuminotecnico del locale considerato soddisfa solo requisiti di base come l'illuminamento medio mantenuto sul piano orizzontale, il controllo dell'abbagliamento da luce artificiale mediante UGR e l'assenza di sfarfallamento ed effetti stroboscopici. Ci si riferisce, pertanto, ai criteri di progettazione identificati nella EN 15193 come di scarsa qualità. In questo caso il LENI calcolato risulta superiore al LENI limite e di conseguenza l'impianto non rispetta la normativa.

3.2.1. La luce naturale nella valutazione energetica della norma EN 15193/2007

La norma EN 15193 consente di tenere conto della disponibilità di luce naturale introducendo, per ciascuna area esposta, un fattore medio di luce diurna D . In base alla (6), tale fattore è funzione di D_c , che a sua volta dipende dall'indice di profondità $I_{DE} = a_D/\Delta h$, dall'indice di trasparenza $I_T = A_c/A_D$ e dall'indice dovuto alla presenza di ostruzioni, I_O :

$$D_c = (4,13 + 20 I_T - 1,36 I_{DE}) \cdot I_O \quad (7)$$

La Figura 28 mostra l'andamento di I_T e I_{DE} al variare di Δh . Si noti che, per bassi valori di Δh , I_{DE} è costante e pari a 2,5 fino a quando la profondità dell'area esposta non uguaglia quella dell'intero locale. Ad un ulteriore aumento di Δh , cresce il denominatore mentre il numeratore a_D rimane costante, determinando un andamento

decescente. Cosa diversa accade invece per I_T : per bassi valori di Δh , A_D aumenta più velocemente di A_C , determinando un andamento decrescente, fino a quando, una volta raggiunta la dimensione limite per A_D , corrispondente all'intera profondità del locale, l'andamento ne risulta invertito.

Combinando insieme i due indici e fissato I_0 in funzione delle ostruzioni presenti, si ottiene il fattore di luce diurna D_c .

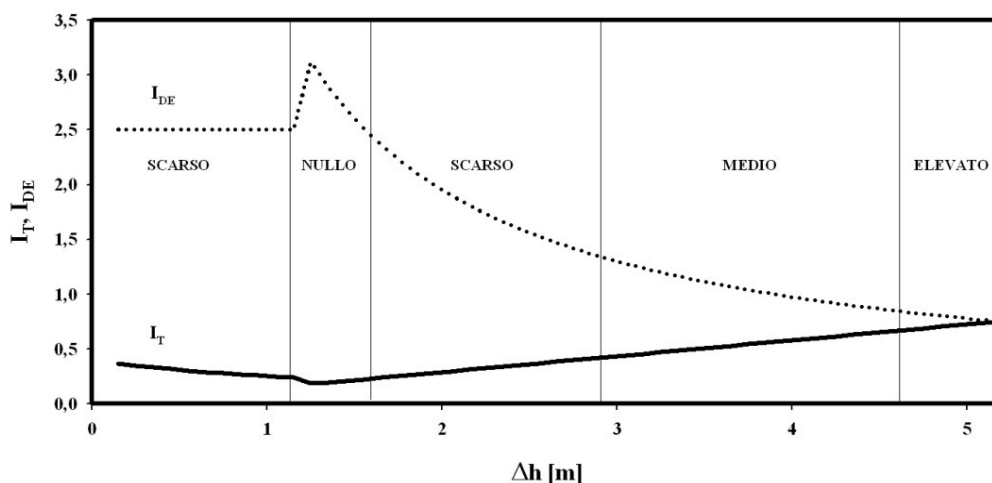


Figura 248 - Indice di profondità (I_{DE}) e indice di trasparenza (I_T) al variare di Δh

In Figura 29 è riportato il confronto tra D_c ed il fattore di luce diurna medio FLD_{medio} ottenuto mediante un modello simulato con il software DIALUX (DIALUX, 2009), in funzione di Δh . In base alla (6) si evince che il fattore di luce diurna D_c , fissate le caratteristiche dell'infisso, risulterà sempre inferiore a D_c .

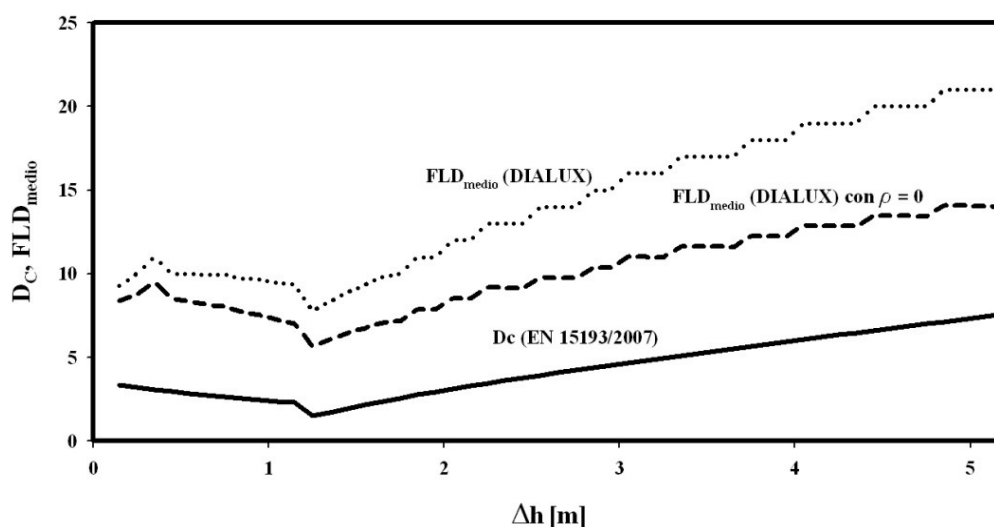


Figura 259 - Confronto tra il fattore di luce diurna D_c secondo la EN15193/07e l'FLD medio calcolato con il software DIALUX

La simulazione, che esclude completamente la presenza degli infissi, è stata eseguita nel primo caso tenendo conto degli effettivi fattori di riflessione delle pareti, del pavimento e del soffitto e dunque considerando anche l'aliquota relativa alla componente riflessa internamente, e in un secondo caso considerando nulla tale componente, avendo posto tutti i fattori di riflessione pari a zero.

Dal confronto emerge chiaramente come il fattore di luce diurna, valutato secondo normativa, sottostima il contributo di luce naturale, ponendosi a vantaggio di sicurezza, non solo rispetto ad una condizione realistica, ma anche rispetto ad una condizione limite estremamente sfavorevole ($\rho = 0$). In funzione del valore assunto dal fattore medio di luce diurna, la norma definisce quattro intervalli di penetrazione della luce naturale, all'interno dei quali, a parità di altre condizioni, il LENI assume un valore costante.

Il grafico in Figura 30, ottenuto facendo variare l'angolo di ostruzione da corpi prospicienti tra 0° e 52° a parità di tutte le altre condizioni, mostra appunto questo andamento caratteristico del LENI al variare del livello di penetrazione della luce naturale.

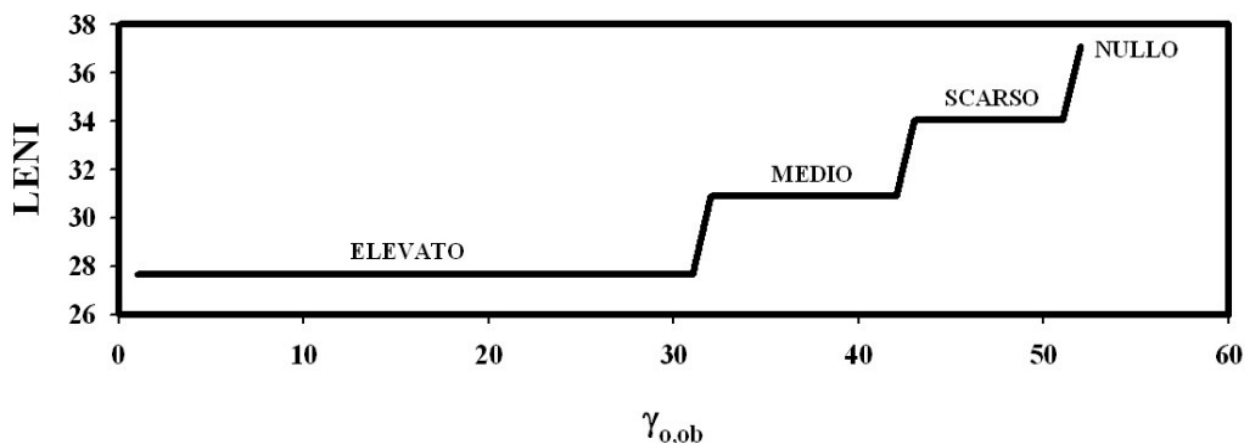


Figura 30 - Il LENI al variare dell'angolo di ostruzione da corpi prospicienti

Al medesimo risultato si giunge facendo variare uno qualsiasi degli altri parametri utili alla determinazione del livello di penetrazione della luce naturale.

3.2.2. **Valutazione del LENI mediante stima più accurata della luce naturale**

Una stima più accurata del LENI è stata eseguita mediante una simulazione con il software DIALUX. Per ciascun mese dell'anno sono state definite tre giornate tipo: con cielo coperto, parzialmente coperto e sereno senza componente diretta.

Tabella 9 – Ore di integrazione giornaliera per tre modelli di cielo

	Ore di integrazione giornaliera per le diverse condizioni di cielo										
MESE	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Set	Ott	Nov	Dic
Coperto	12	12	7,5	5,5	4	4	4	6	9,5	12	12
Parz. Coperto	9	6,5	4,5	3	2	1,5	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5
Sereno	12	8,5	6	4	3	3	5	5	6,5	12	12

Per ciascuna di tali condizioni è stato rilevato l'illuminamento sul piano orizzontale esterno in assenza di ostruzioni e, tramite il fattore di luce diurna medio sulla superficie utile calcolato per il locale oggetto dello studio ($FLD = 3,74\%$), è stato possibile risalire all'illuminamento medio per le diverse ore del giorno in cui il locale è utilizzato. Considerando che l'impianto viene attivato quando l'illuminamento medio sulla superficie utile risulta inferiore ai 500 lux di progetto, sono state definite per ogni mese le ore di integrazione on/ off giornaliera per ciascun modello di cielo. In Tabella 9 sono riportati i periodi di integrazione per gli undici mesi di funzionamento del locale.

Utilizzando i dati meteorologici messi a disposizione dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Napoli Federico II [117], che riportano per ciascun mese dell'anno le occorrenze delle diverse condizioni di cielo, calcolate mediamente tra il 2001 e il 2007 (Tabella 10), è risultato possibile risalire alle ore di integrazione mensili e quindi annuali.

Tabella 10 – Occorrenze delle diverse condizioni di cielo a Napoli

	Giorni per mese nelle diverse condizioni di cielo a Napoli										
MESE	Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Set	Ott	Nov	Dic
Coperto	19	17	9	7	5	4	5	4	10	16	20
Parz. coperto	10	5	12	12	11	16	11	10	12	11	9
Sereno	2	6	10	11	15	10	15	16	9	4	2

Combinando i dati delle Tabelle 9 e 10 e considerando il calendario accademico per tener conto dei giorni di chiusura del locale, si è valutato un fabbisogno pari a 951,40 kWh/anno. Avendo posto inoltre F_A pari a 0,3, si è ottenuto un fabbisogno di energia annuo pari a 665,98 kWh/anno ed un LENI di 23,3 kWh/m² anno.

3.2.3. **Confronto tra i risultati**

Diverse soluzioni sono state messe a confronto per due possibili installazioni relative al caso studio. La prima è quella realmente esistente nel locale con sei plafoniere a soffitto, illuminazione diretta e con potenza nominale di 432 W, la seconda installazione prevede invece l'utilizzo di apparecchi a flusso semi-indiretto, migliorando alcuni aspetti del comfort visivo, ma con un incremento del 33% della potenza nominale che assume il valore di 573 W. La EN 15193 classifica qualitativamente le installazioni in base ai criteri progettuali. La qualità più scarsa, identificata con un solo asterisco, si riferisce ad impianti che soddisfano solo alcuni dei requisiti tra quelli indicati nella norma EN 12464-1, come l'illuminamento medio mantenuto sul compito visivo, l'UGR e l'assenza di effetti di sfarfallamento e stroboscopici. Per la categoria di classe media, contraddistinta da due asterischi, si aggiungono altri requisiti come il controllo delle riflessioni da velo e dell'abbagliamento riflesso, la buona resa cromatica delle sorgenti, il modellato e l'illuminamento delle superfici verticali. Con tre asterischi, classe di qualità alta, si intende invece un impianto eseguito con criteri di progettazione particolarmente accurati che tengano conto anche dell'illuminamento cilindrico e degli aspetti legati alla salute degli occupanti.

Per ciascuna classe di qualità il LENI limite dipende dai sistemi di controllo presenti, come riportato in Tabella 11. La prima installazione (illuminazione diretta) rispetta i requisiti di progettazione di qualità scarsa (*), mentre per la seconda installazione sono rispettati i requisiti della categoria media (**). La Figura 32 mostra come il LENI calcolato per le due soluzioni esaminate superi i limiti della normativa. Sono stati quindi proposti degli interventi per la messa a norma dell'impianto. Con il controllo di presenza manuale e di illuminamento automatico, i valori rientrano nella norma, mentre ciò non accade con il controllo automatico di presenza e senza alcun controllo sull'illuminamento.

Tabella 11 – LENI limite per la categoria scuola

		*	**	***
Controllo di presenza	Controllo di illuminamento	kWh/(m ² anno)		
MANUALE	MANUALE	34,9	44,9	54,9
MANUALE	AUTOMATICO	31,9	40,9	49,9
AUTOMATICO	MANUALE	27,0	34,4	41,8
AUTOMATICO	AUTOMATICO	24,8	31,4	38,1

Con i due sistemi di controllo combinati, l'impianto rientra appena nei limiti imposti. La soluzione migliore, dunque, si ottiene controllando automaticamente solo l'illuminamento e regolando di conseguenza il flusso luminoso.



Figura 31 - Simulazione del caso studio in DIALUX

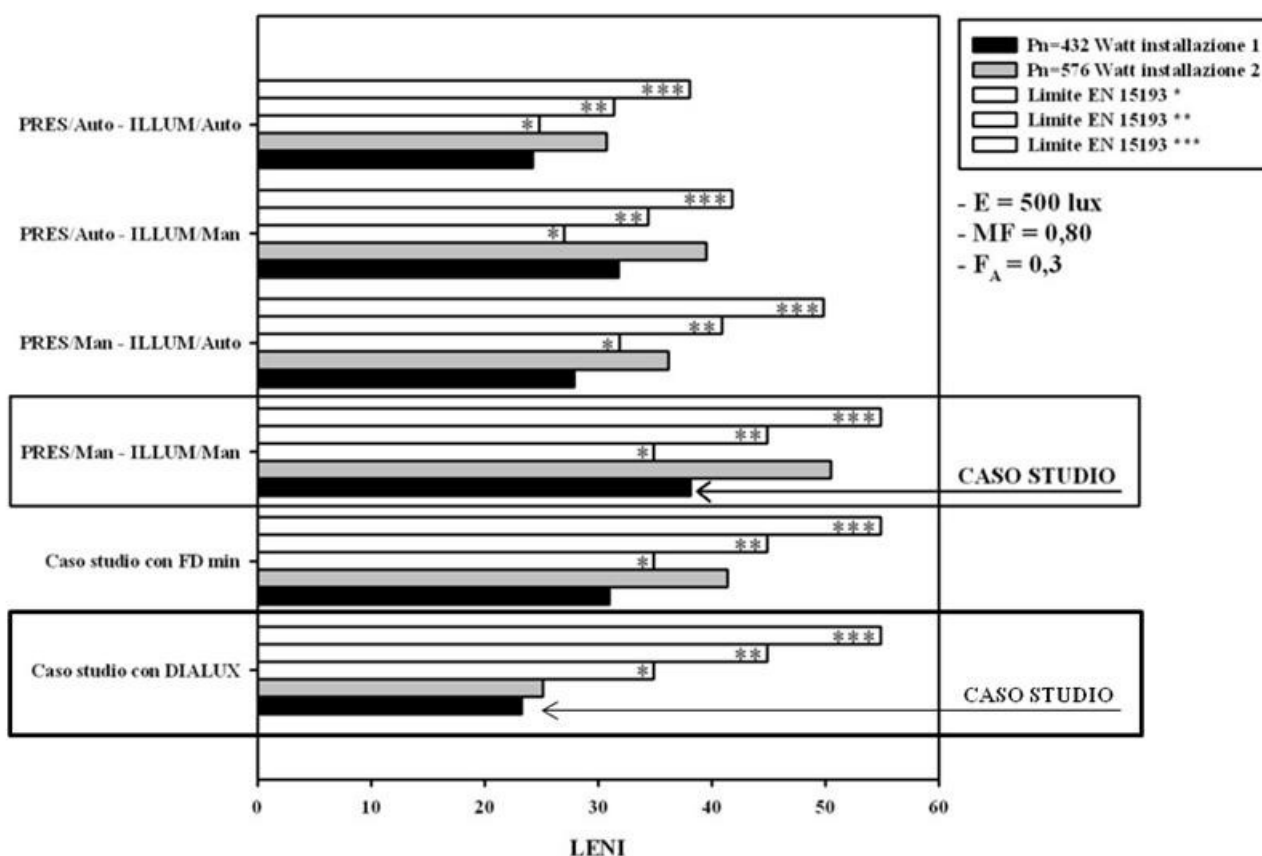


Figura 32 – Confronto tra diverse soluzioni con $F_A=0,3$

Sempre dalla Figura 32 si evince che, nell'ipotesi in cui il fattore di dipendenza dalla luce naturale F_D fosse minimizzato, assumendo il massimo contributo possibile della luce naturale, ad entrambe le installazioni sarebbe corrisposto un LENI inferiore a quello limite, senza alcun intervento dei sistemi di controllo. Inoltre, si riscontra come il LENI, valutato mediante una stima più accurata della luce naturale, risulta ben inferiore a quello limite, per entrambe le installazioni. Dunque un'analisi più accurata sull'utilizzo della luce naturale disponibile può essere determinante ai fini dell'analisi energetica riguardante l'illuminazione, come anche riportato nella norma stessa.

4. CONCLUSIONI

Dallo studio e dall'analisi condotta si possono trarre le seguenti conclusioni:

- ***In merito all'uso della luce naturale per il risparmio energetico***, la EN 15193 del 2007, tenendo conto della EN 12464-1, orienta il progettista verso una migliore qualità degli impianti, sia sotto il profilo del risparmio energetico che del comfort visivo. Come si deduce infatti dai risultati ottenuti, non sempre la sola installazione di sistemi di controllo risulta sufficiente a ridurre il LENI entro i valori limite. A volte si rende necessaria un'accurata progettazione del sistema di illuminazione che permetta l'innalzamento dei valori limite in cambio di migliori condizioni di comfort visivo e di salute per l'occhio. La procedura per la valutazione del contributo della luce naturale riportata in normativa risulta estremamente semplificata e poco accurata: non si tiene infatti conto delle caratteristiche ottiche delle superfici interne e delle ostruzioni esterne, ed anche la modellazione geometrica di tali ostruzioni risulta approssimativa. Tuttavia, nella stessa normativa è consigliato di effettuare calcoli più accurati per quanto riguarda la valutazione del fattore di luce diurna in modo da ridurre il valore del LENI, come si riscontra dai risultati ottenuti, con una diminuzione del 39%.

Si osservi che in queste analisi non è stata considerata la presenza di opportuni sistemi schermanti atti a controllare il fenomeno dell'abbagliamento da luce naturale.

I vantaggi che si possono ottenere mediante i sistemi di controllo dipendono dall'effettivo utilizzo dei locali, dalla disponibilità della luce naturale e dal fattore di manutenzione dell'impianto. L'opportunità dei controlli automatici va valutata tenendo conto di questi aspetti e considerando anche i costi di acquisto e di installazione di tali sistemi che, in alcune circostanze, potrebbero rivelarsi eccessivi rispetto alle reali prospettive di risparmio energetico offerte.

Ovviamente, ai fini del risparmio energetico dell'edificio nella sua globalità, nella definizione dei criteri di progettazione del sistema di illuminazione, occorre tenere conto delle interazioni con gli altri impianti.

• **Per l'aspetto del comfort visivo**, si può concludere che di sicuro l'abbagliamento dipende da quattro fattori fondamentali delle sorgenti potenzialmente abbaglianti:

- L'angolo solido;
- La vicinanza all'asse di vista;
- La luminanza assoluta
- La luminanza relativa (rispetto all'ambiente circostante).

Il DGI di sicuro tiene conto di questi aspetti, attraverso grandezze quali l'angolo solido ω , l'angolo solido corretto Ω , la luminanza L_s della sorgente potenzialmente abbagliante, la luminanza media della finestra L_w e quella del background L_b .

Il confronto tra gli indici di valutazione dell'abbagliamento, proposto nel presente lavoro, ha mostrato che il DGI, attraverso la sua applicazione standard per la valutazione dell'abbagliamento psicologico, non è in accordo con il discomfort realmente provato dai soggetti analizzati in prove percettive con l'indice DDG. La Figura 24 mostra che quando la luminanza della parte inferiore della finestra simulata è ridotta, la sensazione di discomfort del soggetto tende gradualmente a diminuire:

- Nei primi due casi passa da appena non confortevole ad appena percepibile (Figure 24, 25 e 26);
- Nel terzo caso, passa da appena intollerabile ad appena non confortevole (Figure 24, 25 e 26).

Invece, nelle stesse condizioni, il DGI presenta un trend non ben definibile.

Le condizioni di comfort cambiano in un modo del tutto differente da quelle realmente percepite dai soggetti, in particolare quando i termini al numeratore ed al denominatore della relazione del DGI, rispettivamente le luminanze parziali delle due aree distinte (L_s) e la luminanza media della finestra (L_w), presentano differenti valori.

Tale considerazione è ottenuta modificando il metodo di applicazione del DGI.

Il "first method" tiene conto di una sola finestra con il valore della luminanza pari alla luminanza media delle due superfici separate.

Nel "second method" la finestra è sostituita da due finestre con luminanze omogenee, e la luminanza parziale e quella media assumono lo stesso valore (Figure 23).

In entrambi i casi, il DGI ed il DDG presentano un andamento confrontabile, anche se permane una differenza tra le due scale di valutazione (Figure 25 e 26).

In conclusione, lo studio dell'abbagliamento dovrebbe essere esteso all'intero campo di vista, sostituendo la distinzione tra cielo, ostruzione e terreno, con una suddivisione in aree a luminanze omogenee i cui limiti di soglia andrebbero definiti di volta in volta, sulla base del range dinamico totale dell'intera scena.

Inoltre, come tutti gli indici di comfort della Fisica Sensoriale, anche quello relativo all'abbagliamento psicologico da luce naturale deve essere fondato su dati statistici, al fine di tener conto anche della variabilità della percezione del discomfort a seconda del soggetto.

Per il futuro sarebbe auspicabile migliorare il Sistema HDR per l'Analisi delle Immagini [112], al fine di catturare le immagini ed analizzare i risultati per ulteriori prove in situazioni reali. I risultati ottenibili potrebbero essere utili alla definizione di un nuovo e più affidabile indice di valutazione dell'abbagliamento da luce naturale.

BIBLIOGRAFIA

1. Van den Beld G.J. *Licht und Gesundheit*, In: Tagung Licht 2002 – Maastricht 22-23.
2. Veitch J.A. *Principles of healthy lighting: highlights of CIE TC 6-11's forthcoming report*, In: Fifth International LRO lighting research symposium. Orlando (FL) 1-8 (2004).
3. Van Bommel W.J.M., Van den Beld G.J. *Lighting for work: a review of visual and biological effects*, Lighting Research and Technologies 36(4):255-269 (2004).
4. Brainard G.C. *Photoreception for regulation of melatonin and the circadian system in humans*, In: Fifth International LRO lighting research symposium. Orlando (FL) (2004).
5. Glickman G., Hanifin J.P., Rollag M.D., Wang J., Cooper H. and Brainard G.C. *Inferior retinal light exposure is more effective than superior retinal exposure in suppressing melatonin in humans*, Journal of biological rhythms 2003 18(1):71-79.
6. Van Bommel W. *Visual, biological and environmental aspects of lighting: recent new findings and their meaning for lighting practice*. Leukos 2005 - 2(1):7-11.
7. Markus T.A. *The function of windows: a reappraisal*, Building Science 2, (1967), 97-121.
8. Cuttle C. *People and windows in workplaces*, In: Proceedings of the People and Physical Environment Research Conference, Wellington, New Zealand, (1983), 203-212.
9. Heerwagen J.H., Heerwagen D.R. *Lighting and psychological comfort*, Lighting Design and Application 16 (4) (1986), 47-51.
10. Galasiu A.D., Veitch J.A. *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review*. Energy and Buildings 38 (2006), 728-742.
11. Veitch J.A. *Lighting quality contributions from biopsychological processes*, Journal of the Illuminating Engineering Society 30 (1) (2001), 3-16.

12. Veitch J.A. *Psychological processes influencing lighting quality*, Journal of the Illuminating Engineering Society 30 (1) (2001), 124–140.
13. Veitch J.A., Hine D.W., Gifford R. *End users' knowledge, beliefs, and preferences for lighting*, Journal of Interior Design 19 (2) (1993), 15–26.
14. Veitch J.A., Gifford R. *Assessing beliefs about lighting effects on health, performance, mood, and social behavior*, Environment and Behavior 28 (4) (1996), 446–470.
15. Inui M., Miyata T. *Spaciousness in interiors*, Lighting Research and technologies, (5) (1973), 103–111.
16. Boubekri M., Hull R., Boyer L. *Impact of windows size and sunlight penetration on office workers' mood and satisfaction: A novel way of assessing sunlight*, Environment and Behavior 23 (4) (1991), 474–493.
17. Manning P. *Windows, environment and people*. Interbuild/Arena, (1967), 20–25.
18. Huges C. *An examination of the beneficial action of natural light on the psychobiological system of man*, In Proceedings of CIE 20th session, D603/1–4.
19. Heerwagen J.H. *Windowscapes: the role of nature in the view from the window*, International Daylighting conference, Proc. II (1986), Long Beach, Ca.
20. Markus T.A. *The function of windows: a reappraisal*, Building Science, 2 (1967) 97–121.
21. Markus T.A. *The significance of sunshine and view for office workers*, In proceedings of CIE Conference on sunlight in buildings, Newcastle upon Tyne, England. Bouwcentrum International, Rotterdam, (1967) 59–93.
22. Ne'eman E., Hopkinson R.G. *Critical minimum acceptable window size, a study of window design and a provision of a view*. Lighting Research and Technologies, 2 (1970), 17–27.
23. Keighley E.C. *Visual requirements and reduced fenestration in offices – A study of window shapes*, J. Building Sci., 8 (1973), 311–320.

24. Keighley E.C. *Visual requirements and reduced fenestration in offices – A study of multiple apertures and window area*, J. Building Sci., 8 (1973), 321-331.
25. Tabet K.A., Sharples S. *Climatic and cultural preferences in window design*, In Proceedings of 2nd european conference on architecture. Paris, France (1989), 82-85.
26. Leather P., Pyrgas M., Beale D., Lawrence C. *Windows in the workplace: Sunlight, view, and occupational stress*, Environment and Behavior 30 (1998) 739–762.
27. Christoffersen J., Johnsen K., Petersen E., Valbjorn O., Hygge S. *Windows and Daylight – A post-occupancy evaluation of Danish offices*, In: Lighting 2000, Proceedings of the CIBSE/ILE Joint Conference University of York, UK:CIBSE, (2000), 112–120.
28. Daryanani S. *Design considerations for the daylighting of new commercial buildings*, In Proceedings of the international daylighting conference, phoenix, Arizona. International Daylighting Conference, Washington (1983), 189-191.
29. Morgan C.J. *Sunlight and its effects on human behaviour and performance*, In proceedings of CIE Conference on sunlight in buildings, Newcastle upon Tyne, England. Bouwcentrum International, Rotterdam, (1967) 21-26.
30. Hopkinson R.G. *The psychophysics of sunlghting*, In proceedings of CIE Conference on sunlight in buildings, Newcastle upon Tyne, England. Bouwcentrum International, Rotterdam, (1967) 13-20.
31. Collins B.L. *Review of the psychological reaction to windows*, Lighting Research and techonologies, 8(2) (1976), 80-88.
32. Collins B.L. et al. *A new look at windows*, Washington: National Bureau of Standards, Center for Building Technology, SBSIR, (1977), 77-1388.
33. Vischer J.C. *The effects of daylighting on occupant behaviour: new direction for research*, International Daylighting conference, Long Beach, Ca, 1986, 419-429.
34. Hollister F.D. *Greater London Council: a report on the problems of windowless environments*, (1968) London Hobbs.

35. Holm W., Roessler G. *Sunlight in dwellings*, In Proceedings of the CIE study group A symposium (1972), Varna – Bulgaria.
36. Langdon F.J., Loudon A.G. *Discomfort in schools from overheating in summer*, Journal of the institute of Heating and Ventilating Engineers, (1970) 37:265-274.
37. Kay J.D. *Daylighting for schools*, Light and Lighting (1963) 56: 252-257.
38. Nimnicht G.P. *Windows and school design*. Phi Delta Kappa, (1966), 47: 305-307.
39. Perkins L.B. *Windows and learning*, Glass, Metal and Glazing. October 1966: 11-14.
40. Burts E. *Windowless classroom: windows helps to promote better classroom learning*, NEA Journal, (1961) 50: 13-14.
41. Demos G., davis S., Zuwaylif F.E. *Controlled physical environment*, Building Research 4 (1967), 60-62.
42. Plant C.G.H. *The light of the day*, Light and Lighting 63 8(1970), 292-296.
43. Ruys J. *Windowless offices*, University of Washington, 1970.
44. Bernardo H. et al. *Predictable impact of lighting control on the Energy consumption of a building through computational simulation*, In Proceedings of ICREPQ'09 – Valencia (Spain) 15 – 17 April 2009.
45. Galasiu A.D., Veitch. J.A. *Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylit offices: a literature review*, Energy and Buildings 38 (2006) 728-742.
46. Boyce P.R. et al. *Occupant use of switching and dimming controls in offices*, Lighting Research and Technologies 38,4 (2006) 358-378.
47. Nabil A., Mardaljevic J. *Useful Daylight Illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings*, Lighting Research and Technologies 37,1 (2005) 41-59.

48. Kurian C.P. et al. *Robust control and optimisation of Energy consumption in daylight-artificial light integrated schemes*, Lighting Research and Technologies 40 (2008) 7-24.
49. Newsham G.R. et al. *Individual control of electric lighting in a daylit space*, Lighting Research and Technologies 40 (2008) 25-41.
50. Gugliermetti F., Bisegna F. *A model study of light control systems operating with Electrochromic Windows*, Lighting Research and Technologies 37,1 (2005) 3-20.
51. Wong N.H., Istiadji A.D. *Effecto of external shading devices on daylight penetration in residential buildings*, Lighting Research and Technologies 36,4 (2004) 317-333.
52. Robbins C. L. *Daylighting. Design and Analysis*, Van Nostrand Reinhold book 1986.
53. Eble-Hankins M.L. et al. *VCP and UGR glare evaluation systems: a look back and a way forward*, Leukos 1,2, 2004, 7-38.
54. Tuaycharoen N., Tregenza P.R. *Discomfort glare from interesting images*, Lighting Research and Technologies 37,4 (2005) 329-341.
55. Osterhaus W.K.E. *Discomfort glare assessment and prevention for daylight applications in office environments*, Solar Energy 79(2005) 140-158.
56. Cheung H.D., Chung T.M. *A study on subjective preference to daylit residential environment using con joint analysis*, Building and Environment 2008 vol. 43, no12, pp. 2101-2111.
57. Heshong L. et al. *Skylighting and retail sales: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, Research report for Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, California, 1999
58. Heshong L. et al. *Daylighting in schools: an investigation into the relationship between daylighting and human performance*, Research report for Pacific Gas and Electric Company, San Francisco, California, 1999.

59. Lee E.S., Sekowitz S.E. *The New York Times Headquarters mockup: monitored performance of the daylight control system*, Energy and Buildings 38(2009) 914-929.
60. Lorenz W. *A glazing unit for solar control, daylighting and energy conservation*, Solar Energy (2000) 70, 109.
61. Beck A., Korner W., Gross O. and Fricke J. *Making better use of natural light with a light-redirecting double*, Solar Energy (1999) 66, 215.
62. Athienitis A. K. and Tzempelikos A. *A Methodology for detailed calculation of room illuminance levels and light dimming in a room with motorized blinds integrated in an advanced window*. Proceedings of eSim Canadian Building Simulation Conference, (2001) Ottawa, Canada, 77–84.
63. Vartiainen E., Peippo K. and Lund P. *Daylight optimization of multifunctional solar facades*, Solar Energy (1999) 68, 223.
64. Lee E. and Selkowitz S. (1995) *The design and evaluation of integrated envelope and lighting control strategies for commercial buildings*. ASHRAE Transactions 101, 326.
65. Lee E., DiBartolomeo D. and Selkowitz S. (1998) *Thermal and daylighting performance of an automated venetian blind and lighting system in a full-scale private office*. Energy and Buildings 29, 47.
66. Scheatzle D. (1990) *Computer controlled window blinds*. Proceedings of the 15th AS/ISES National Passive Solar Conference, Texas, USA.
67. Athienitis A.K., Tzempelikos A. *A methodology for simulation of daylight room illuminance distribution and light dimming for a room with a controlled shading device*, Solar Energy 72(4):2002, 271-281.
68. Wittkopf S.K. *Daylight performance of anidolic ceiling under different sky conditions*, Solar Energy 81(2007) 151-161.
69. Yun G.Y., Mc Evoy M., Steemers K. *Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic façade*, Solar Energy 81(2007) 383-394.

70. Lee E.S., Tavi A. *Energy and visual comfort performance of electrochromic windows with overhangs*, Building and Environment 42(2007) 2439-2449.
71. Trotter A. P., Walsh J.W.T. *The early years of illuminating engineering in Great Britain*, Trans. of the IES (London) vol. 16, n.3, p.57, 1961.
72. Luckiesh M., Guth S.K. *Brightness in visual field at borderline between comfort and discomfort (BCD)*, Trans. of the IES (New York 1949) 44: 650-670.
73. Petherbridge P, Hopkinson R.G. *Discomfort glare and the lighting of buildings*, Trans. of the IES (London 1950) 15: 39-79.
74. Petherbridge P., Longmore J. *Solid angles applied to visual comfort problems*, Light and Lighting 1954 47: 173-177.
75. van Ierald J., Jansen E. *Limitations of disability glare from windows*, Proceedings of the CIOE TC4.2 Symposium (Istanbul, Turkey, 1973), pp. 127-141.
76. Reinhart C.F., Mardaljevic J., Rogers Z. *Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design*, Leukos 3,1 (2006).
77. *Glare from windows* – Report of CIE Division 3 – R3-19 (Velds-Knupp) (nov 2006).
78. Kim W., Koga Y. *Glare constant G_w for the evaluation of discomfort glare from windows*. Solar Energy 78 (2005) 105-111.
79. Eble-Hankins M. L., Waters C. E. *VCP and UGR Glare Evaluation Systems: A Look Back and a Way Forward*. Leukos, vol.1, n.2 , pp. 7–38, 2004.
80. Hopkinson R.G., Petherbridge P., Longmore J. *Daylight in Architecture*. London, William Heineman Ltd, 1966, p. 68.
81. Moon P., Spencer, D.E. *Illuminance from non uniform sky*. Illuminating Engineer, Vol. 37, p. 707. 1942.
82. Love, J.A. *The evolution of performance indicators for the evaluation of daylighting systems*. [Industry Applications Society Annual Meeting, 1992, Conference Record of the 1992 IEEE](#), vol.2 1830-1836.

83. Love J.A., Navaab M. *The VH ratio: a new indicator of daylighting performance*, Proceedings of the 1990 International Daylighting Conference, Moscow.
84. Nabil A., Mardaljevic J., *Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings*. Lighting Research and Technologies 37,1 (2005) 41-59.
85. Nabil A., Mardaljevic J., *Useful daylight illuminance: a replacement for daylight factors*. Energy and Buildings 38(2006) 905-913.
86. Robbins C.L. 1984. *A method for predicting Energy savings attributed to daylighting*. SERI/TR-254-1664. Golden, Colorado: Solar Energy Research Institute.
87. Chauvel P. et al. 1980, *Glare from windows: current views of the problem*. Building Research Establishment. London: HMSO.
88. Hopkinson R.G. 1963. *Architectural physics: lighting*. London: HMSO.
89. Bellia L., Cesarano A., Spada G., *Application of videophotometer in the evaluation of DGI in scholastic environment*. International Journal on Architectural Science, Vol. 6, 2, pp.82-88, 2005.
90. Nazzal A.A., *A new evaluation method for daylight discomfort glare*. International Journal of Industrial and Ergonomics 35(2005) 295-306.
91. Iwata, T., M. Shukuya, N. Somekawa, K. Kimura (1992a). *Experimental study on discomfort glare caused by windows - Subjective response to glare from a simulated window*, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, No. 432, pp. 21-33.
92. Iwata, T., M. Tokura, M. Shukuya, K. Kimura (1992b). *Experimental study on discomfort glare caused by windows. Part 2 - Subjective response to glare from actual windows*, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, No. 439, pp. 19-31.
93. Tokura, M., T. Iwata, M. Shukuya, K. Kimura (1993). *Experimental study on a method for evaluation discomfort glare from windows*, Proceedings of the 2nd Lux Pacifica.

94. Tokura, M., T. Iwata, M. Shukuya (1996). *Experimental study on discomfort glare caused by windows, part 3. Development of a method for evaluating discomfort glare from a large light source*, Journal of Architecture, Planning and Environmental Engineering, No. 489, pp. 17-25.
95. Iwata T., Tokura M., *Examination of the limitations of predicted glare sensation vote (PGSV) as a glare index for a large source: Towards a comprehensive development of discomfort glare evaluation*. Lighting Research and Technologies. 30(2) 1998, 81-88.
96. Meyer, J.J, D. Francioli, P. Rey (1993a). *Observed variation of lighting conditions versus feelings of visual discomfort in VDT operators: Application of a new model*, Proceedings of Lux Europa 1993, pp. 332-339, Edinburgh, United Kingdom.
97. Meyer, J.J, D. Francioli, P. Rey, F. Benoît (1993b). *Visual discomfort: Evaluation after introducing modulated light equipment*, Proceedings of Right Light, 2nd European Conference on Energy-Efficient Lighting, pp. 348-357, Arnhem, the Netherlands.
98. Sick, F. (1994). *Zur Notwendigkeit einer umfassenden Bewertung des visuellen Komforts und zur Entwicklung eines entsprechenden Komfort-Indexes*, Proceedings of Licht '94, pp. 755-773, Interlaken, Austria.
99. Sick, F. (1995). *A simulation approach to determine a visual comfort index including daylight for adequate building performance evaluation*, Proceedings of Building Simulation '95 conference, the 4th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, pp. 295-300, Madison, Wisconsin, USA.
100. Wienold, J., K. Beckinger, P. Apian-Bennewitz, C. Reetz, C. Reinhart (1998). *Stationary Virtual Reality (SVR) – A new method for predicting user acceptance of daylighting systems*, Proceedings of the First CIE Symposium on Lighting Quality, pp. 178-182, Ottawa, Canada.

101. Wienold J., Christoffersen J.; *Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras*; 38; 2006; 743-757; Energy and Buildings.
102. Velds, M. (2000). *Assessment of lighting quality in office rooms with daylighting systems*, Ph.D. Thesis of Delft University of Technology, Delft, the Netherlands.
103. M.E. Aizelwood, *Measuring the performance of advanced daylighting systems*. Proceedings of Daylighting '98. An International Conference on Daylighting Technologies for Energy Efficiency in Buildings, pp. 239-246, Ottawa, Canada, 1998.
104. A.A. Nazzal, *A New Daylight Glare Evaluation Method. Introduction of The Monitoring Control and Calculation Method*. Energy and Building, V. 33, pp. 257-265, 2001.
105. CIE Technical Report, *Discomfort Glare in Interior Lighting*, CIE 117, 1995.
106. Iwata, T., N. Somekawa, M. Tokura, M. Shukuya, K. Kimura (1991). *Subjective response on discomfort glare caused by windows*, Proceedings of the 22nd Session of the Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) - Division 3, pp. 108-109, Melbourne, Australia.
107. Pulpitlova, J., P. Detkova (1993). *Impact of the cultural and social background on the visual perception in living and working perception*, Proceedings of the international symposium 'Design of amenity', Fukuoka, Japan.
108. Boubekri, M., L.L. Boyer (1992). *Effect of window size and sunlight presence on glare*, Lighting Research and Technology, 24, No. 2, pp. 69-74.
109. Waters, C.E., R.G. Mistrick, C.A. Bernecker (1995). *Discomfort glare from sources of nonuniform luminance*, Journal of the Illuminating Engineering Society, 24, No. 2, pp. 73-85.
110. Hopkinson, R.G., J.B. Collins (1970). *Ergonomics of lightings*, MacDonald, London, Great Britain.

111. Bellia L., Cesarano A., Minichiello F., Sibilio S., Spada G.; *Calibration procedures of a CCD camera for photometric measurements; vol. 1*; Vail, Co, USA, 20-22 May 2003; 89-93; In proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference.
112. Bellia L., Cesarano A., Iuliano G.F., Spada G.; HDR Illuminance Mapping Analysis System for Visual Comfort Evaluation; vol. 1; May 5-7 2009; 957-961; In proceedings of IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Singapore.
113. Kim W., Ahn H.T., Kim J.T.; *A first approach to discomfort glare in the presence of non-uniform luminance*; 43; 2008; 1953-1960; Building and environment.
114. Kurian CP., Aithal RS., Bhat J., George VI., 2008. *Robust control and optimization of energy consumption in daylight-artificial light integrated schemes*, In Lighting Res. Technol. 40, 2008, pag 7-24.
115. EN 12464-1: 2002. Light and lighting — Lighting of work places — Part 1: Indoor work places.
116. Hanselaer P., Lootens, C., Ryckaert WR, Deconinck G and Rombauts G. 2007. *Power density targets for efficiently lighting of interior task areas*, In Lighting Res. Technol. 39,2, 2007, pag. 171-184.
117. Mazzearella, http://www.meteo.unina.it/html/modules/napoli/clima_napoli.htm (last access June 2009).